

単一衛星による測位とその精度の向上に関する研究

著者	奥田 邦晴
学位授与機関	東京水産大学
学位授与年度	1994
URL	http://id.nii.ac.jp/1342/00001047/

①

単一衛星による測位と その精度の向上に関する研究

奥田 邦 晴

1994

目 次

第1章 緒論	1
1.1 はじめに	1
1.2 研究の目的と意義	2
1.3 本研究に関する従来の研究	4
1.4 本研究の内容	6
第2章 単一衛星による測位とその精度の向上	8
2.1 はじめに	8
2.2 解析方法	8
2.2.1 最接近時刻法のアルゴリズム	8
2.2.2 NNSのアルゴリズム	12
2.3 測位結果及び考察	20
2.3.1 2つの測位解の判別	20
2.3.2 高仰角の場合	20
2.3.3 低仰角の場合	31
2.4 まとめ	31
第3章 電波屈折による測位誤差	37
3.1 はじめに	37
3.2 電波屈折がドプラ周波数に及ぼす影響	37
3.3 電波屈折による測位誤差	43
3.4 測位置に及ぼす電波屈折の影響を少なくする方法	48
3.5 まとめ	48
第4章 送信周波数が変化した場合の測位誤差	53
4.1 はじめに	53

4.2 シミュレーションによる結果	53
4.3 高仰角の時の測位誤差	56
4.4 低仰角の時の測位誤差	62
4.5 まとめ	67
第5章 衛星の軌道情報に関する測位誤差	68
5.1 はじめに	68
5.2 衛星の左右方向の外れによる測位誤差	68
5.2.1 衛星位置の計算	68
5.2.2 実測した左右方向の外れの値	70
5.2.3 シミュレーションによる結果	72
5.2.4 実測による測位誤差	75
5.3 まとめ	84
第6章 アンテナ及びジオイド高さによる測位誤差	85
6.1 はじめに	85
6.2 シミュレーションによる解析	85
6.2.1 シミュレーションの方法	85
6.2.2 シミュレーションの結果	87
6.3 実測による測位誤差	91
6.4 まとめ	99
用語解説 ジオイド	100
第7章 速力及び方向による測位誤差	103
7.1 はじめに	103
7.2 移動している測位点の推測位置	103
7.3 実測による測位誤差	104
7.4 まとめ	114

第8章 総括	115
謝辞	118
引用文献	119
付録	126

第1章 緒 論

1. 1 はじめに

有史以前から、人間は地球の表面上を広範囲にわたって、漂流または航海により、多くの移動を行っていた。そのうち、船を地球上の一点から、目的とする他の一点へ、安全かつ能率的に航行させる技術である航海術が発達^{1)~5)}してきた。その方法として、太陽や星という天体を利用した歴史は古い。これが天文航法である。天文航法は六分儀で太陽や星を観測して暦や表から船位を計算する。しかし、気象条件の悪いときには天体観測が不可能になり、船位は針路や速力の推測から得られる推測位置によって補わなければならない。無線の発達とともに、どのような気象条件の下でも確実に自分の位置が出せるということから、電波航法が発達してきた。その一つが人工衛星を利用した航法⁶⁾である。広く民間に利用された最初のシステムは、N N S S (Navy Navigation Satellite System) と言い、1個の衛星で測位が可能である。この測位原理を天体観測に例えるならば、太陽を利用して、ある時間間隔で観測を行って測位する隔時観測法のようなものである。このシステムは、必要なとき瞬時に測位が不可能であったので、高速の移動体ではその利用が難しかった。

このようなN N S Sの短所を補って開発されたシステムが、現在広く使用されつつあるG P S (Global Positioning System) である。このシステムは、いつでも頭上に3個以上の衛星が見え、必要なとき瞬時に測位が可能となった。この測位原理を天体観測に例えるならば、夜間多数の星を同時に観測して測位を行う同時観測法のようなものである。このG P Sは、衛星の配置によって測位分布傾向や測位精度が変化する^{7)~11)}が、N N S Sよりも測位精度が良くなっている。

しかし、N N S Sに類するものはG P Sに変わってきているといっても、遭難救助用ブイ、海洋観測ブイ、及びウミガメ・クジラ・イルカ・鳥類といった回遊生物の移動体位置を測定^{12)~14)}するためにN N S S方式が今後も活用される見通しである。

例えば、遭難救助システムの場合をとりあげてみる。一般船舶が遭難した場合、その救助に向かうためには遭難場所の位置が必要である。そのために、これら船

船では、遭難救助用としてのブイを搭載する。このブイは、遭難したとき自動的に電波を発信するようになっている。発信された電波は、ドブラ効果を受けてそれを人工衛星が観測する。人工衛星は地上局にそれを伝送する。地上局では、それら観測データに基づきブイの位置を計算して救助活動が開始されることになる。つまりこの方法は、測位を必要とする側が電波を発信する点で、システム的にはNNS Sと逆になっているだけである。このような遭難及び安全の世界的制度がGMD S S (Global Maritime Distress and Safety System)と言われるものであり、全世界どこでも遭難救助活動ができるシステム^{15)~17)}である。この救助活動の根本となるものは遭難者の位置である。この位置を精度良く求めることができなければ、救助活動は困難を窮める。

また、海洋観測ブイや回遊生物に電波発信機を取り付けて測位を行う例をとりあげてみる。発信された電波は人工衛星が観測し、その観測データを地上局に伝送する。地上局では、人工衛星からの信号を受信し、情報処理センターで発信機の位置の計算や受信データの処理を行う。ユーザはこれら処理されたデータを利用することができるし、また直接受信されたデータを利用することもできる。ここでも測位はNNS Sを逆にした考え方で行うことができる。このような全地球上のあらゆる地域の環境情報を収集するシステムがARG O Sシステム^{18), 19)}である。これら環境状況を科学的に研究する際には、各種データの精度は高いにこしたことはなく、位置においても精度の良いものを求める必要がある。

以上のように、船位を出すためのNNS SはGPSに移ってきたが、その方式の考え方で測位を行うことは、今後とも多方面にわたって使用され続けるであろう。それは、測位対象物が電波を発するだけでよく、また一つの衛星を利用して測位した方がシステムの的に簡単だからである。

従って、その測位精度の向上をはかることは非常に重要なことであり、かつ有意義なことと言える。

1. 2 本研究の目的と意義

NNS Sのアルゴリズムは推測位置を初期値として与え、繰り返し計算によ

て最も確かな位置を求める。船ではその位置を常に確保しておく必要があるので測位前の位置つまり推測位置は保持されている。しかし、遭難救助用ブイ、海洋観測ブイ、及び回遊生物などでは、自ら推測位置を保持することはない。また、測位する側が持続的にそれら測位対象物の位置を保持していれば良いが、そうでない場合も多い。

従って、常に推測位置が保持されているような船舶ではNNS Sのアルゴリズムを使用して測位を行うことができるが、推測位置が保持されていない場合は、他のアルゴリズムによって位置を求めなければならない。

その方法の一つに、極軌道衛星が測位対象物に最も近づく時刻を利用する方法がある。その時刻が分かれば、衛星の直下軌道に対して直角に一本の位置の線を得ることができる。その線上において、ドブラ効果を受けた電波の受信可能時間が、衛星が測位対象物の真上を通る場合に比べてどのように減少するかに着目して位置を求める。この方法は、GMD S Sの極軌道衛星系EPIRB²⁰⁾において採用されている。

また、もう一つの方法に、極軌道衛星の軌道データ、計算された発信周波数、ドブラ効果を受けた受信周波数から、衛星位置を中心としたいくつかの位置の円錐面を描いて位置を求める方法がある。これらの円錐面と測位対象物が存在する地球面との交点が位置となる。この方法は、ARG O Sシステム^{21)~23)}において採用されている。

以上の二つの方法のうち、前者の測位精度は90%確率で2.7nm(海里)²⁴⁾と言われており、NNS Sの0.2nm程度^{25)~28)}と比較してかなり精度が劣る。また、後者ではARG O S情報センターで計算された結果として、測位精度を4つのクラスに分け²¹⁾、そのクラスのうち最も良い測位精度がNNS Sの場合とほぼ同じ程度であると言われている。また、ARG O Sシステムでは、トランスローケーション法や衛星軌道補正法によって、測位精度の向上をはかった研究^{29), 30)}がある。しかし、ユーザが衛星から受信されたそのままのデータを手に入れ、単独測位計算する場合には、その測位方法について一考する余地があると考えられる。

そこで、測位精度の面ではNNS Sのアルゴリズムによる方法が優れているので、NNS Sのアルゴリズムを全面的に使用して測位計算し、その向上をはかった。また、測位計算方法にも工夫を加え、初期値として必要な推測位置は、衛星

が最も測位点に近づく時刻を利用して求めた。

このような測位方法を採用することにより、測位前の情報に依存することなく、データが得られた時点で精度の良い測位を行うことができるので、推測位置を保持していない測位対象物にとっては有効な方法であり、かつ有意義なことと考える。

1. 3. 本研究に関する従来の研究

世界で最初の人工衛星である旧ソ連のスプートニク1号の電波を受信していたアメリカのJohns Hopkins 大学の研究者たちは衛星からの電波がドブラ効果を受けて変化することを発見した。そして、軌道の明らかな人工衛星からの電波のドブラ効果を測定すれば、受信した場所がどこであるかが求められるという考えを提案³¹⁾した。これがドブラ効果を利用した衛星航法の始まりである。この提案を受けたアメリカ海軍はJohns Hopkins 大学に研究委託し、NNSS開発に着手、研究^{32)~34)}が行われた。

日本においても、これらの提案が紹介^{35)~37)}され、このシステムを使用したときの測位誤差が解析された。

本研究は、NNSSのアルゴリズムを使用している測位誤差を解析しているので、まずNNSSの測位誤差に関する従来の研究を述べる。そこで、NNSSの測位誤差の原因となる要素を大別^{38), 39)}すると下記のような。

- (1) 機器による誤差
- (2) 衛星の軌道情報による誤差
- (3) 電波伝搬による誤差
- (4) アンテナ及びジオイド高さによる誤差
- (5) 速度、針路による誤差

(1) については、衛星及び利用者の機器に関するもので、一番の問題点となるのは水晶発信機の発振周波数であるが、その安定度は良くなっているため、実際上特に問題はない³⁹⁾とされている。

(2) については、衛星の位置を計算する情報の誤差に関するもので、地上局

で衛星軌道の予測計算が行われ、その情報が衛星のメモリに入れている。この予報値^{40)~42)}から求めた衛星位置は、受信点の位置を求める基準点として使われるので、その位置の予測に誤差があると、それに応じた測位誤差が生じるので、できるだけ正しい位置を求めなければならない。これらについては、不断の改良^{43), 44)}がなされ、数10mの誤差³⁹⁾におさえられている。

(3) については、このシステムの中で特に問題となるところである。2つの種類の周波数を使うことにより、電波伝搬による誤差はほとんど取り除くことができるが、普通は1つの周波数しか使っていないので、測位方法の改善が試みられた。その結果、経度方向の誤差の改善^{45)~49)}がなされている。

(4) については、測位対象物のアンテナ高さの誤差と地球の重力分布から生ずるジオイド高さの誤差による測位誤差であり、シミュレーションの結果とともに解析され、アンテナ及びジオイド高さの誤差が10m位では測位精度にあまり影響がないことが解析^{38), 39), 50)~54)}されている。

(5) については、測位対象物が移動している場合、その速度と方向（針路）に誤差があったときの測位誤差であり、速度に誤差があるときは正比例的に測位誤差は大きくなるが、その誤差は方向によって変化することが解析^{38), 39), 51)}されている。

以上の従来解析は、衛星を見る仰角を10°以上70°乃至75°までとしており、70°乃至75°を越えると測位誤差が大きくなるとの理由で、実測の解析がなされていない。本研究では85°位まで実用に耐え得るような測位精度の改善を試みるとともに70°乃至75°以下でもより精度が向上する解析を行っている。

次に、推測位置を求める方法として、本研究では衛星が測位対象物に最も近づく時刻によって位置の線を求める方法を採用したが、この方法は時刻が正確に求められないので実用には無理である⁵⁵⁾とされている。しかし、推測位置を求めるのであれば多少の時刻の誤差はあっても良いので、この方法を採用することにした。また、この位置の線上で測位点を決定するとき、測位点と衛星との距離を求める方法が示されている⁵⁵⁾が、この方法は、距離に誤差があると衛星仰角が高いときには位置が決定できない場合がある⁵⁶⁾。

そこで、位置の線上で観測ドブラ曲線と同じドブラ曲線を求めて、測位点（推

測位置)を決定する方法⁵⁷⁾を解析した。なお、この測位方法によく似た方法で、ハード的に発信周波数の安定度を良くして測位精度の向上をはかったものに、極軌道衛星系EPIRBの研究⁵⁸⁾がある。しかし、市販されているEPIRBの発信周波数はそれ程の安定度はない。

1. 4 本研究の内容

本研究では、推測位置を最接近時刻法で求め、それを初期値としてNNSSのアルゴリズムで再度測位を行っている。そうすることによって、測位対象物が推測位置を保持していない場合でも測位精度が向上するということを骨子としている。また、従来のNNSSのアルゴリズムでは、衛星を見る仰角が70°乃至75°以上という高い場合には、測位誤差が大きくなるので、測位に使用していなかったが、誤差が多く含まれるデータを測位計算に用いないことによって、測位精度を向上させる工夫を行っている。さらに、原因別による測位誤差の解析も行っている。

各章は次のような内容になっている。

第2章においては、最接近時刻法によって概算の位置を求め、それを初期値としてNNSSのアルゴリズムで再度位置を求める。ここでは、衛星を見る仰角が高い場合と低い場合とに分けて述べている。

第3章から第7章までは、第2章で述べた測位方法について、測位精度を向上させる工夫と、原因別による測位誤差を述べている。

まず第3章では、電波屈折がドブラ周波数に及ぼす影響を実測に基づいて解析し、衛星を見る仰角によって測定時間を制限すれば、測位精度の向上がはかれることを述べている。

第4章では、送信周波数が変化した場合の測位誤差をシミュレーションと実測にもとづいて解析し、測位精度の向上性を述べている。

第5章では、衛星の軌道情報に関する測位誤差の中で、衛星の軌道からの横方向の外れ情報も測位計算に入れた方が少しでも測位精度の向上につながることを述べている。

第6章では、アンテナ及びジオイド高さの誤差による測位誤差をシミュレーションと実測にもとづいて解析し、高さの誤差が大きくなければ測位精度にそれほど影響しないことを述べている。

第7章では、速度及び方向の誤差による測位誤差をシミュレーションと実測にもとづいて解析し、方向によって測位誤差の大きさが異なるということを述べている。

第8章は全体のまとめである。

第2章 単一衛星による測位とその測位精度の向上

2. 1 はじめに

ドブラ効果を利用して測位点の位置を求める極軌道型衛星システムの一つに、測位点に衛星が最も近づく時刻を求めて位置を算出する方法⁵⁸⁾がある。この方法によると、衛星が最も測位点に近づく時刻では、衛星の直下軌道に対して直角に一本の位置の線が得られる。その線上において、衛星を見る仰角が分かれば測位点の位置を求めることができる。この測位方法は、推測位置を必要としないので、推測位置を保持できない測位対象物にとっては大きな利点である。しかし、その測位精度は、送信周波数の安定度に多く依存するために測位誤差が大きくなることが多い。一方、N N S Sの測位原理⁵⁹⁾は、推測位置を初期値として与え、周波数の安定度に依存しないアルゴリズムで繰り返し計算を行い、その測位誤差は小さい。

そこで、この章では、推測位置を保持できない測位対象物に対して、まず最接近時刻による方法で位置を求める。それを推測位置として考え、再度N N S Sのアルゴリズムで測位計算を行い、より精度の高い位置を求める解析⁵⁷⁾を行った。

2. 2 解析方法

2. 2. 1 最接近時刻法のアルゴリズム

ドブラ効果を受けた電波を受信すると、図2-1に示すようなドブラ曲線を描く。衛星と測位点とが最も近づく時刻は、ドブラシフト Δf が0になる時刻であるから、この時刻を求めれば良いことになる。最接近時刻が求められと、図2-2に示すように衛星の直下軌道に対して直角にドブラシフトが0になる一本の位置の線が得られる。この線上では、図2-3に示すように衛星を見る仰角に応じたドブラ曲線が得られるので、観測ドブラ曲線と同じドブラ曲線が得られるように仰角を求めると測位点が求められる。最接近時刻の仰角は最大仰角となり、ドブラ

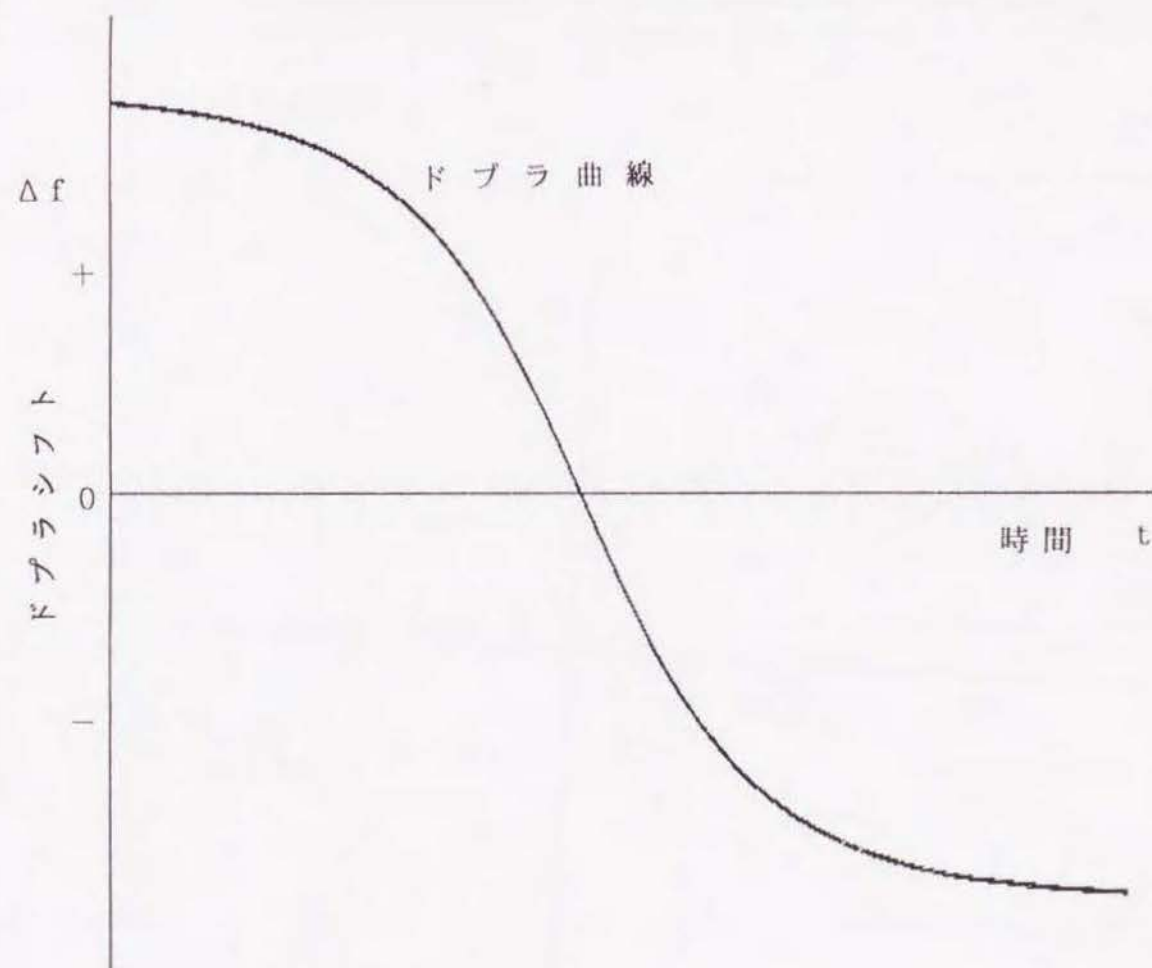


図 2 - 1 ドプラ曲線

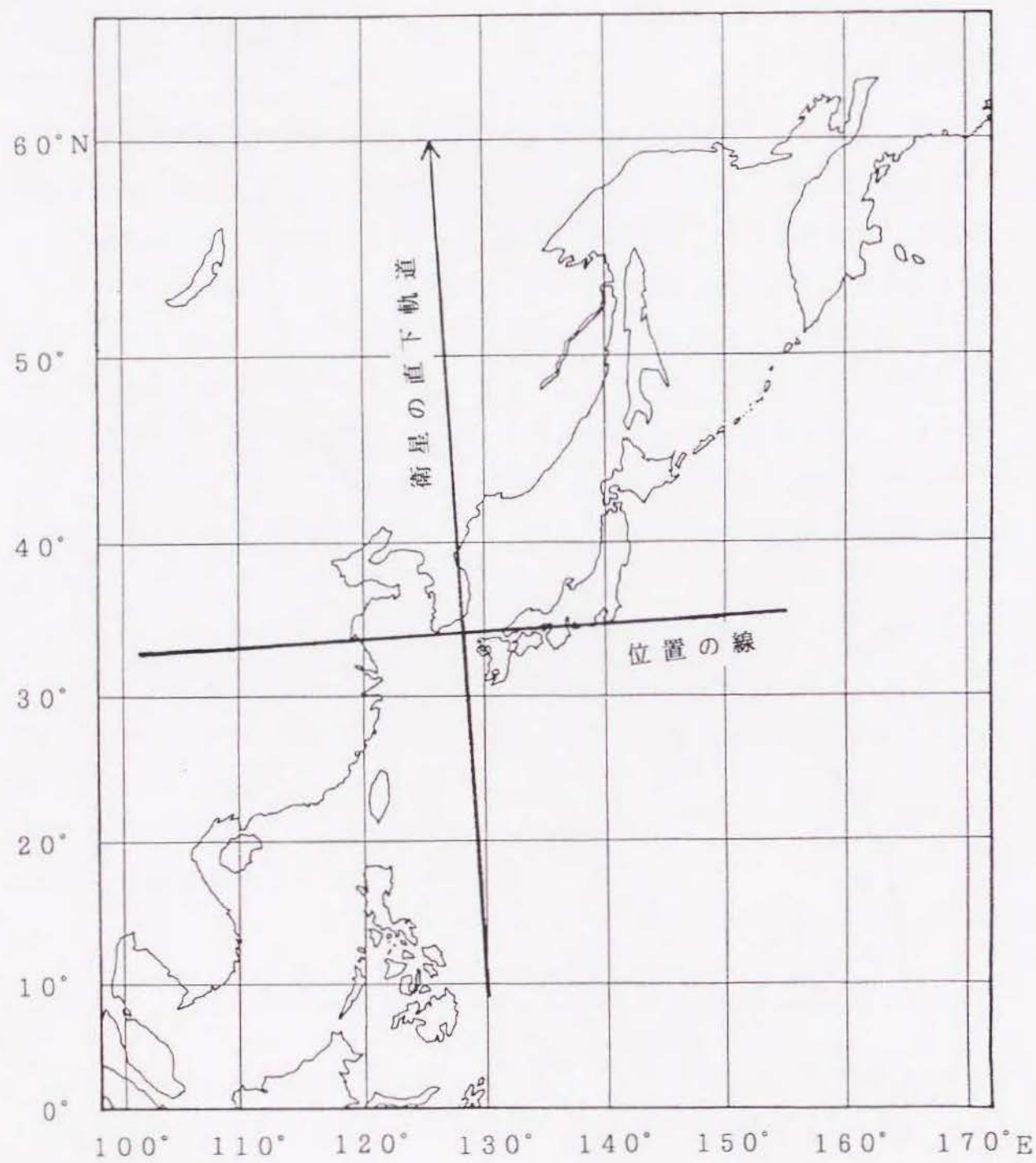


図 2 - 2 最接近時刻の位置の線

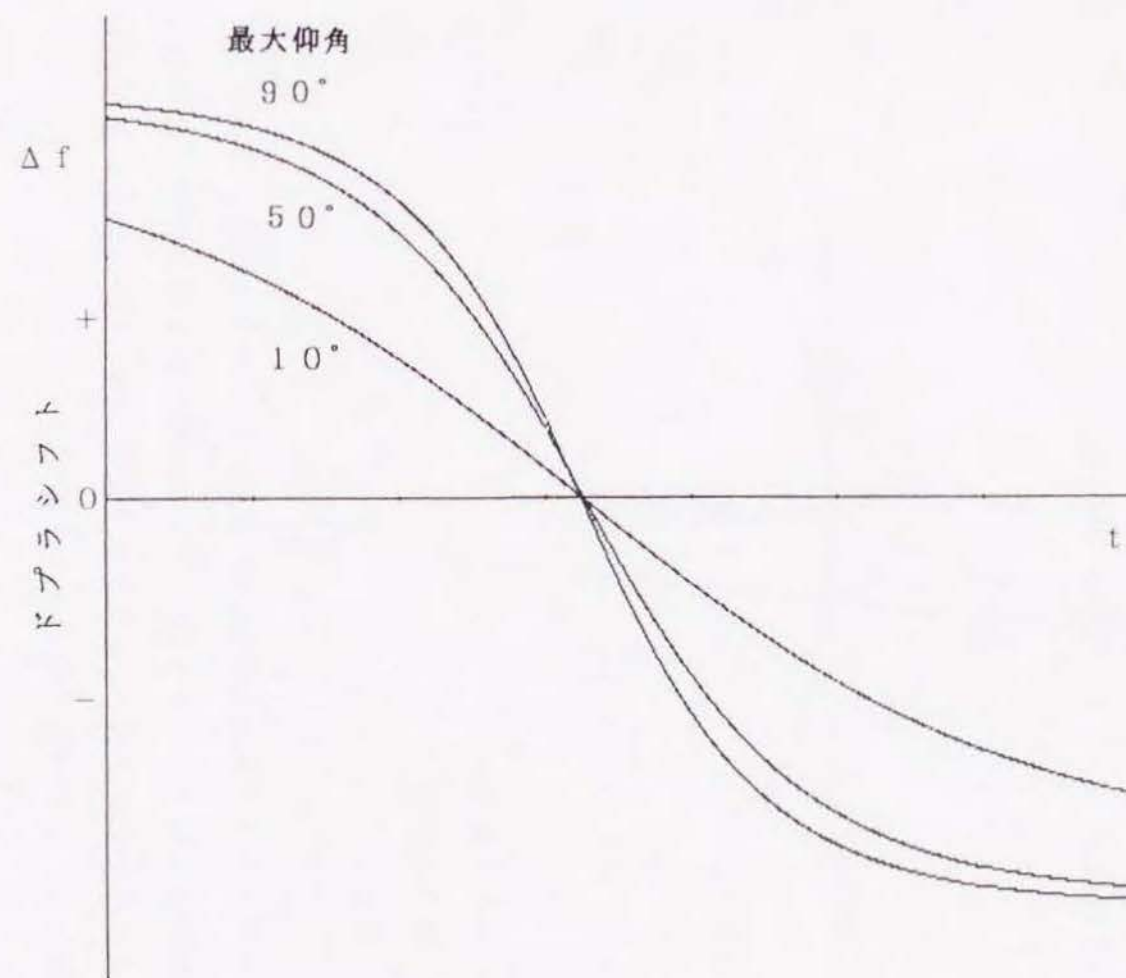


図 2 - 3 仰角別ドプラ曲線

シフトとの関係は次のようになる。

最接近時刻 t_c における衛星と測位点の距離を D_c とする。地球半径を R 、また衛星の高度を H とすると、図2-4に示すような関係になる。従って、次式を得ることができ、仰角 θ を表すことができる。

$$\cos(90+\theta) = \{D_c^2 + R^2 - (R+H)^2\} / (2 \cdot D_c \cdot R)$$

故に

$$\theta = \sin^{-1}(-D_c^2 + 2 \cdot H \cdot R + H^2) / (2 \cdot D_c \cdot R) \quad (2-1)$$

ここで、 D_c は次式⁵⁵⁾によって与えられる。

$$D_c = f \cdot v^2 / C / \{d\Delta f(t)/dt\}_{t=t_c} \quad (2-2)$$

f : 送信周波数

v : 衛星の速度

C : 光速

なお、ほぼ同じドブラ曲線が衛星の直下点に関して東西対称に存在するが、送信周波数が高精度に安定していれば、ドブラ曲線は衛星が測位点の東を通るか西を通るかによって僅かに違う⁵⁸⁾ので、東西の判別がつく。また、衛星仰角の異なる2回の測位を行って判別することもできる。

2. 2. 2 NNSのアルゴリズム

NNSは1967年に受信測位技術が民間に公開されて以来、受信方式はすべて同じもので、その測位原理⁵⁹⁾は次の通りである。

NNSに属する衛星は399.968MHzと149.988MHzの周波数の電波を送信すると

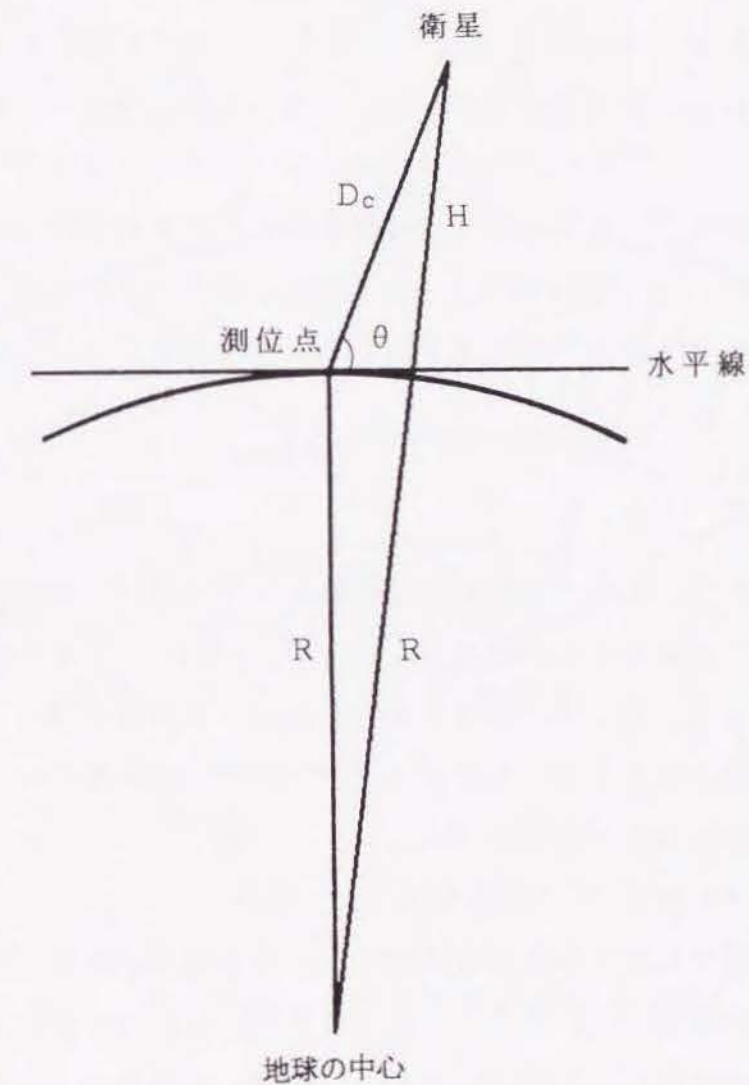


図2-4 最接近時刻における衛星と測位点の関係

ともに、その送信電波にのせて、2分ごとの時間信号と、その時間の衛星の位置が計算できる一連の軌道情報を送信している。図2-5に示すように、衛星は地球上空を通りながら、 t_0, t_1, t_2, \dots という位置で時間信号を送信している。このとき、 $t_1 - t_0, t_2 - t_1, \dots$ の時間はすべて正しく2分で、衛星と測位点との間の距離は $D(t_0), D(t_1), D(t_2), \dots$ というようにしだいに測位点に近づき、その後しだいに遠のき水平線に没してしまう。このとき測位点側では衛星からの周波数をカウントしておく。この周波数はドプラ効果を受けているので衛星の送信周波数との差から、衛星と測位点の距離の変化が求められることになる。今、 ΔD を衛星と測位点の距離の変化、 N を2分間の受信カウント数、 f_T を送信周波数、 λ を電波の波長とすると次式で表される。

$$\Delta D = \lambda (N - 120 \cdot f_T) \quad (2-3)$$

このようにして、衛星と測位点との距離の変化（差）が実測で求められたので、そのときのその距離差一定の軌跡は t_0, t_1, t_2, \dots の衛星位置を焦点とする回転双曲面となる。測位点が地球表面にあれば、この双曲面の一面と地球面の交わった線が位置の線となる。各双曲面ごとに位置の線が得られるので、図2-6に示すようにその交わりが測位点となる。

この測位原理を数式⁵⁹⁾で表すと次のようになる。

測位点で衛星から受ける受信周波数を f_R 、受信装置の中にある周波数の安定な基準発信器の周波数を f_L とすると、受信機内では $(f_L - f_R)$ という周波数が作られる。時間信号が受信機に到着するごとに $(f_L - f_R)$ を積算カウントする。このことは次のように表せる。

$$N_k = \int_{t_{k-1} + \Delta t_{k-1}}^{t_k + \Delta t_k} (f_L - f_R) dt \quad (2-4)$$

ここで、 N_k : 積算カウント数

Δt_k : 時間信号が衛星から受信機まで伝わる時間

k : 0, 1, 2, 3, ...

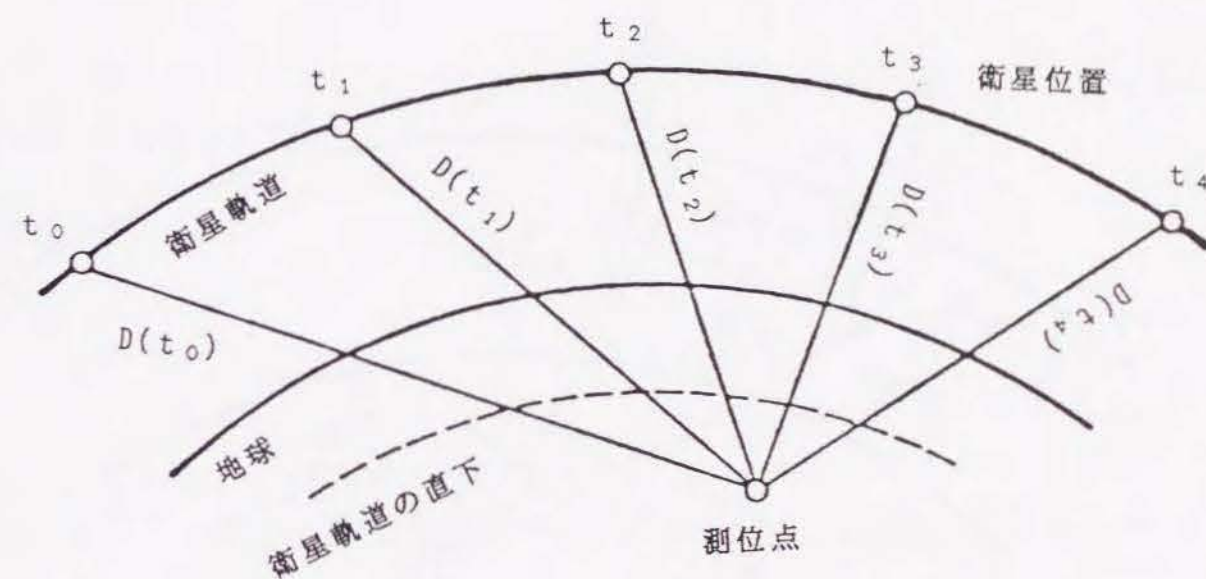


図2-5 衛星軌道と測位点の関係⁵⁹⁾

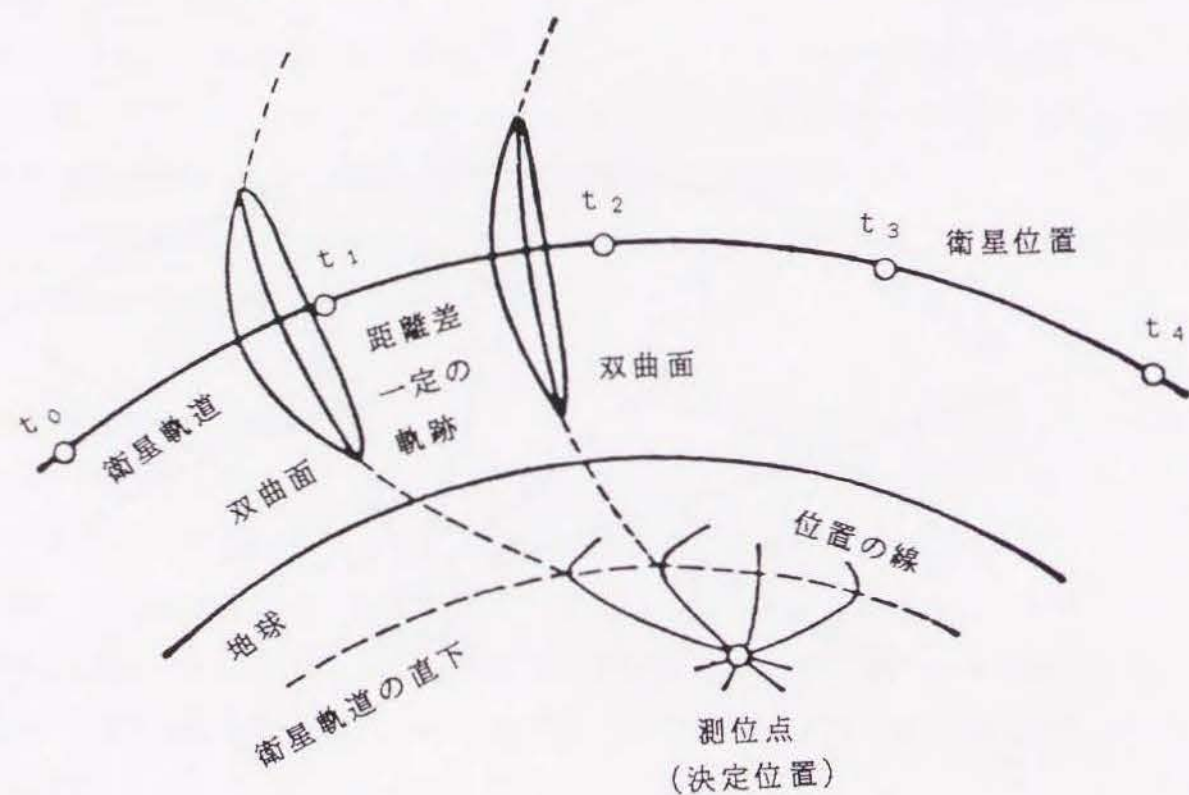


図 2-6 測位原理⁵⁹⁾

このことを図で示すと図 2-7 のようになる。2-4 式を変形すると

$$N_k = \int_{t_{k-1} + \Delta t_{k-1}}^{t_k + \Delta t_k} f_L dt - \int_{t_{k-1} + \Delta t_{k-1}}^{t_k + \Delta t_k} f_R dt \quad (2-5)$$

右辺第一項は、 $f_L \{(t_k + \Delta t_k) - (t_{k-1} + \Delta t_{k-1})\}$ に等しくなり、

また、 $\int_{t_{k-1} + \Delta t_{k-1}}^{t_k + \Delta t_k} f_R dt = \int_{t_{k-1}}^{t_k} f_T dt$ なので、 N_k は次のようになる。

$$\begin{aligned} N_k &= f_L \{(t_k + \Delta t_k) - (t_{k-1} + \Delta t_{k-1})\} - f_T (t_k - t_{k-1}) \\ &= (t_k - t_{k-1})(f_L - f_T) + (\Delta t_k - \Delta t_{k-1})f_L \end{aligned} \quad (2-6)$$

この式で、 $(t_k - t_{k-1})$ は 2 分間であり、これを ΔT とおく。

f_L を 400MHz とすれば、 f_T は 399.968MHz であるから $f_L - f_T$ は 32kHz になり、これを ΔF とおく。

Δt_k と Δt_{k-1} は電波の伝わる時間で、電波の伝搬速度を c とすると、

$$\Delta t_k = D(t_k) / c, \quad \Delta t_{k-1} = D(t_{k-1}) / c$$

となり、2-6 式は

$$N_k = \Delta T \Delta F + (f_L / c) \{D(t_k) - D(t_{k-1})\} \quad (2-7)$$

となる。 $D(t_k) - D(t_{k-1})$ は t_{k-1} から t_k までの時間の距離差であるから、これを ΔD_k とおく。また、 f_L / c は f_L の波長を λ_L とすると $1 / \lambda_L$ であるので、2-7 式は次のようになる。

$$\Delta D_k = \lambda_L N_k - \lambda_L \Delta F \Delta T \quad (2-8)$$

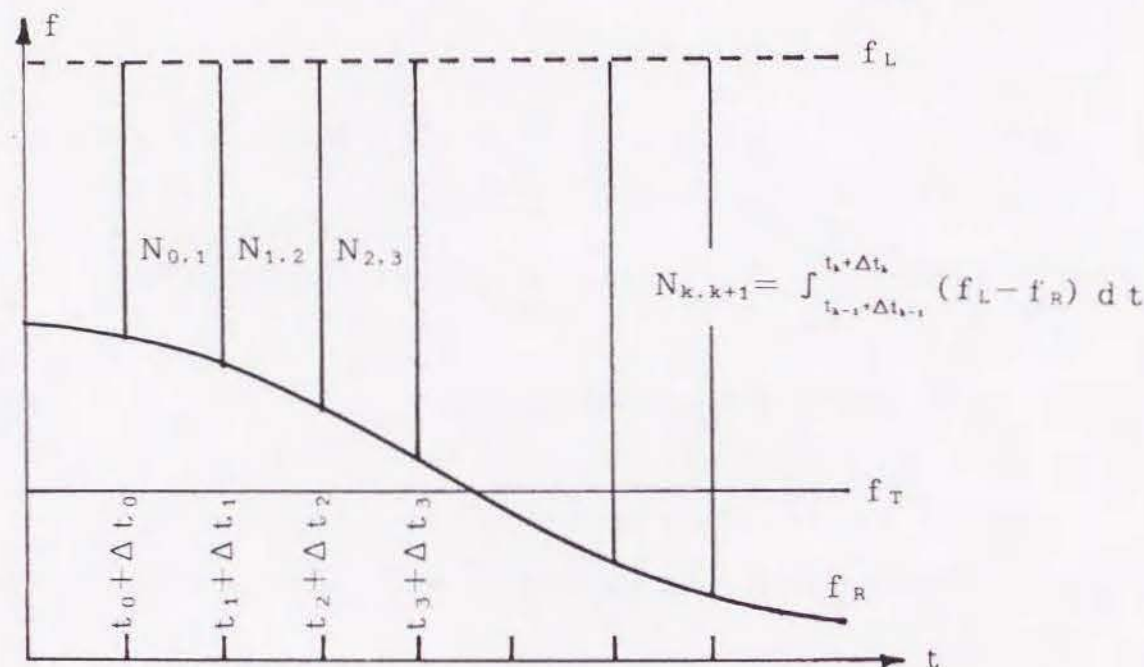


図 2-7 ドブラ周波数の積算カウント⁵⁹⁾

従って、2-4 式の N_k を測定すれば、 ΔD_k を得ることができる。この ΔD_k を求める過程においては時刻という考え方は入っておらず、その精度はある時間内に積算されるカウントに依存することになる。これが N N S S の基本原理であり、 N_k が測定される数だけ 2-8 式から距離差 ΔD_k が得られる。

このようにドブラ周波数を測定すると、ある時間の衛星と測位点との距離差（実測距離差）が分かる。一方、ドブラ周波数を測定しなくても衛星の位置と測位点の位置（推測）とによって距離差が分かる。積算カウントが正確に測定され、測位点の位置も正確であれば、前者と後者の距離差は一致する。一致しなければ、両者に誤差があることになるが、前者の実測距離差が正確なものとするれば、測位点の位置の方が正確でないことになり、この場合は測位点の位置を更新して一致するようにする。このことを式で表すと次のようになる。

$$S_{k1} \Delta \phi + S_{k2} \Delta \lambda + S_{k3} \Delta f = D_{ok} - D_{ck} \quad (2-9)$$

$\Delta \phi$ 、 $\Delta \lambda$ 、及び Δf は、測位点の位置を更新する幅の値で、それぞれ緯度、経度、衛星の送信周波数と受信機側の基準周波数との差（周波数差）である。 S_{k1} 及び S_{k2} は、衛星と測位点までの距離の変化を表す偏微係数である。 S_{k3} は、周波数差の単位あたりの変化による実測距離差の変化率である。また、 D_{ok} はドブラ周波数を測定したときの衛星と測位点の実測距離差であり、 D_{ck} は衛星と測位点の位置（推測）とから計算した距離差である。 $\Delta \phi$ 、 $\Delta \lambda$ 、及び Δf の更新の幅は分からないので未知数となる。この方程式は、ドブラ周波数を測定してドブラカウントが求まり、その前後の衛星位置が計算できる数だけ作れるが、未知数の数が 3 つなので、3 つ以上なければ計算することはできない。繰り返し計算をして、 $\Delta \phi$ 、 $\Delta \lambda$ 、 Δf が十分小さくなれば測位点の最も確からしい位置が求まったことになる。

なお、衛星と受信機側の周波数は短期的にみれば変化はなく安定しているので、周波数は一定としたアルゴリズムとなっている。

また、N N S S のアルゴリズムの場合でも、衛星の軌道直下点に関して東西対

称に測位点が存在するが、1つの推測位置に対しては1つの測位点しか求められない。

2. 3 結果及び考察

2. 3. 1 2つの測位解の判別

2. 2の項で、衛星の直下点に関して東西対称に2つの測位解が存在するということを述べたが、この項では2回の測位で、どちら側が測位点の方であるかを判別する方法について述べる。

図2-8には固定地点で、衛星の直下点に関して東西対称に2つの推測位置を与えてNNSSのアルゴリズムで測位を行った結果を示している。+が真の位置側の方であるが、この図の縮尺では一点になっている。縮尺を大きくすれば、ばらついていることが分かる。○は衛星の直下点に関して真の位置と反対側にあるもう一つの位置を示している。このように、真の位置側の測位点とは逆に大きくばらついているのは、衛星を見る仰角がそれぞれの測位で異なるからである。同じ衛星で続けて測位できる場合や、仰角の異なる他の衛星で測位できる場合には、真の位置側の方は測位対象物が非常に高速で移動しない限り似たような位置が求められ、その対称の位置は大きくばらついている。このことから、どちら側の位置が測位点側かの判別がつく。なお、全く似たような東西対称の位置が2回続けて測位できる可能性もあるが、その確率は非常に小さいものである。

2. 3. 2 高仰角の場合

最接近時刻法においてもNNSSのアルゴリズムにおいても、衛星を見る仰角が高いと経度方向に大きな誤差が生じたり、計算が収束しなかったりする。そのため、NNSSのアルゴリズムでは、仰角が 75° 以上の場合は測位計算を行わなかった。しかし、遭難救助の場合には、人命にかかわることであり、一つでも測

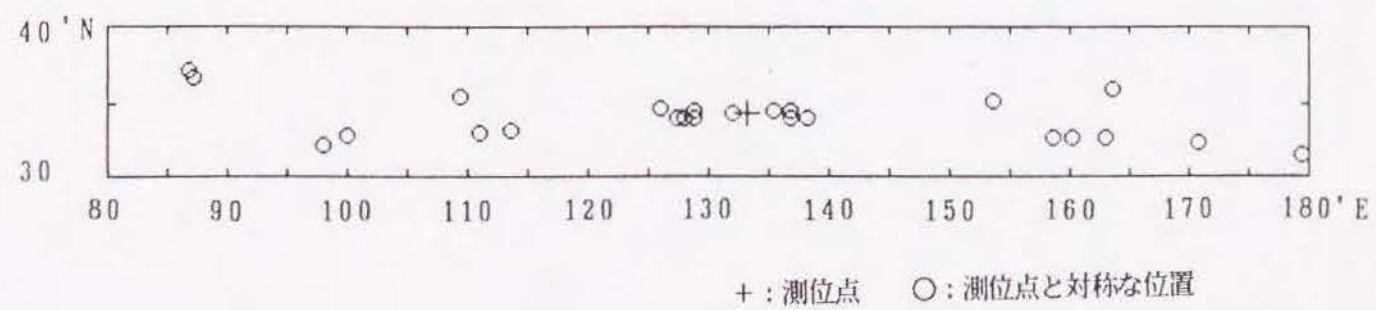


図 2 - 8 測位点と対称な位置

位回数の多い方が良い。そこで、ここでは普通NNSの測位計算に用いない75°から85°の高仰角についての解析結果を示す。

使用データは、NNSのデータ以外は、遭難救助用のため入手不可能であったり、諸外国を介してでないと入手できないなど容易ではなかったのも、ここではNNSのデータを用いて解析した。図2-9にNNS受信データのフォーマットの概略図を示す。400MHz及び150MHzのドブラカウントデータは2分間に26個得られ、カウントの時間間隔は約4.6秒であるが、2分間の最終のカウントのみ約5.0秒になっている。軌道データは26個得られるが、そのうち21個を使用し、残り4個は意味不明のデータとなっている。各データは9桁からなっている。

このようにして得られたデータを使って、次のようにして最接近時刻法による位置を求めるシミュレーションを行った。

ドブラカウントデータより図2-10(a)のようなドブラ曲線 $\Delta f(t)$ を求める。この図では、ドブラシフトが0になる最接近時刻はまだ分からないので、横軸 t はドブラ曲線の下方に描いている。次に、最接近時刻はドブラ曲線の変曲点を求めれば良いことになるので、 $\Delta f'(t)$ を求め、続いて $\Delta f''(t)$ を求めると、図2-10(b)及び図2-10(c)のようになった。図2-10(c)を見ると、変曲点付近では $\Delta f''(t)$ が直線的に変化しているの、この部分で回帰直線を求め変曲点の時刻を求めることにした。回帰直線⁶⁰⁾は次のようにして求めた。

$$\Delta f''(t) = a + bt \quad (2-10)$$

2-10式を回帰直線として与え、係数 a 、 b は次の正規方程式を解くことによって得た。

$$\begin{aligned} na + b \sum t_i &= \sum \Delta f''(t_i) \\ a \sum t_i + b \sum t_i^2 &= \sum t_i \Delta f''(t_i) \end{aligned} \quad (2-11)$$

ここで、 n はデータの個数である。

変曲点付近がほぼ真ん中にくるように測定時間を決め、その時間を変えて回帰

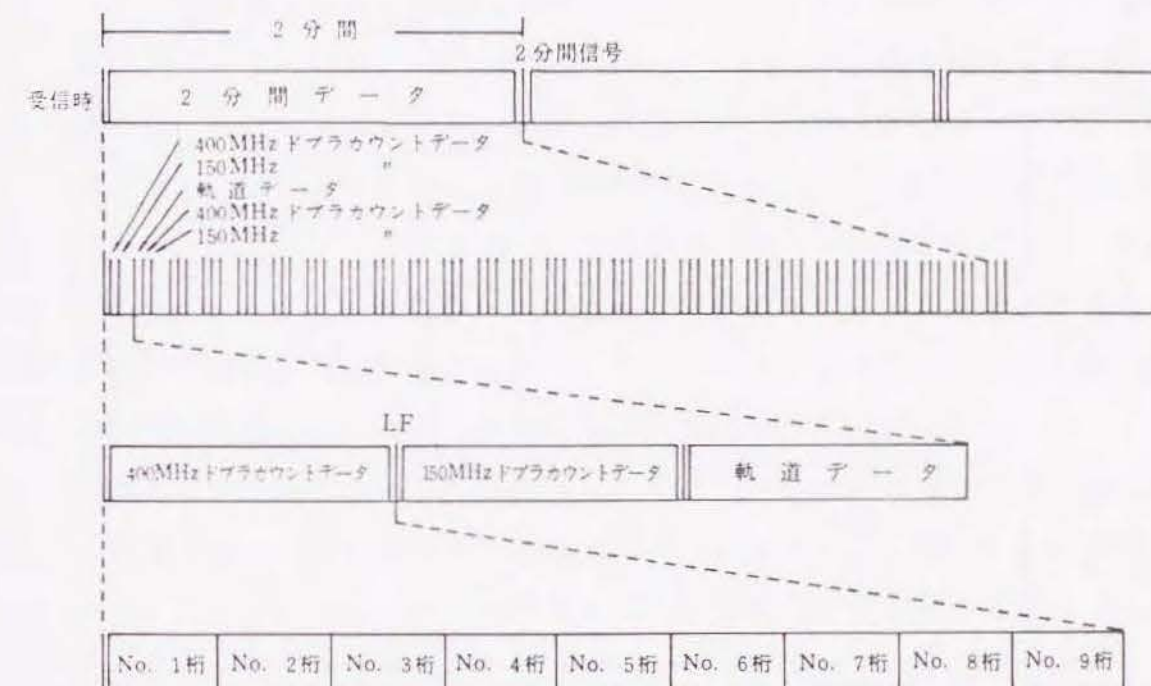


図2-9 NNS受信データのフォーマット

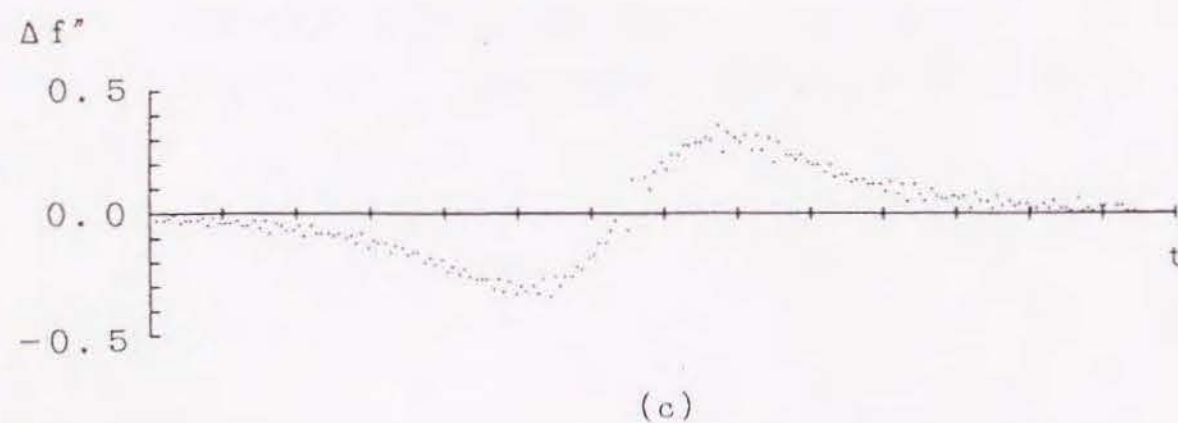
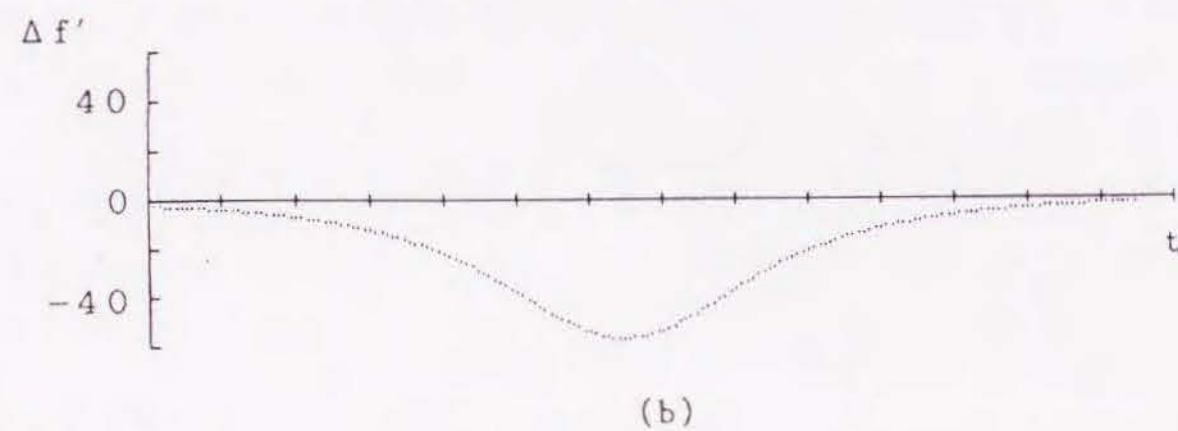
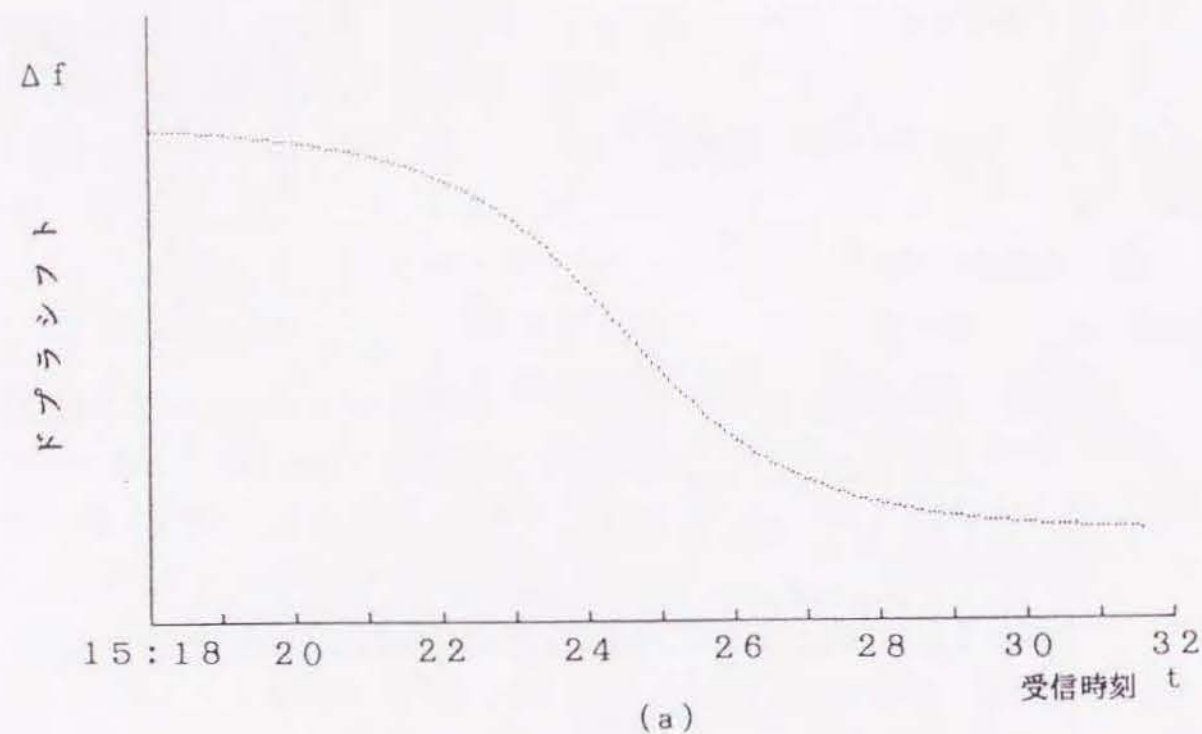


図 2-10 ドブラ曲線の変曲点 (最接近時刻)

直線を求めた一例が図 2-11、及び表 2-1 である。測定時間が変わるとデータの個数も変わるので、表 2-1 の標準偏差の小さい方が正確な最接近時刻を求められるとは言えない。そこで、測定時間はデータ量も適量にある 60 秒間とした。

このようにして最接近時刻を求めると図 2-2 に示したような衛星の直下軌道に対して直角に一本の位置の線が得られるので、この線上において観測ドブラ曲線と同じドブラ曲線が得られるように測位点を求めた。その結果を図 2-12 に示す。真位置は、 $34^{\circ} 15.12' N$ 、 $133^{\circ} 12.42' E$ で、データ数は 10 個である。

この結果は、NNS のドブラデータから計算したものであるから、位置のばらつきは大きい。90% 確率で緯度方向の誤差が約 6.2nm、また経度方向の誤差は約 18.1nm となった。ドブラデータがもっと精度良く得られれば、このばらつきは小さくなるが、ここでは概算の位置を求めることができれば良い。なお、衛星の直下点に関して東西対称に位置が存在するが、2.3.1 の項の方法でどちらが測位点側か判別できるので、測位点側の方の図を示している。

次に、この結果を推測位置として NNS のアルゴリズムで再度測位計算を行う。その結果を図 2-13 に示す。緯度方向の誤差は約 0.1nm となり、経度方向の誤差は約 1.1nm となった。高仰角の場合は、位置の線が平行近くになって交わるので、経度方向に大きな誤差が生じる。

なお、ドブラ曲線の変曲点 (最接近時刻) を求める方法には、最接近時刻付近のドブラ曲線を 3 次曲線で近似して、その式を 2 階微分する方法もあり、この方法も試みた。3 次曲線は次の式によった。

$$\Delta f(t) = a + bt + ct^2 + dt^3 \quad (2-12)$$

2-12 式を 3 次曲線として、正規方程式を作り各係数を求めた。

また、ドブラカウント時間は約 4.6 秒間なので、ドブラ曲線を求めるときにはその平均の値でドブラ周波数を求めている。

そこで、その間 (約 4.6 秒間) をニュートンの補間公式や、ラグランジュの補間式⁶¹⁾によって補間をして変曲点を求めてみた。その方法は次の式によった。

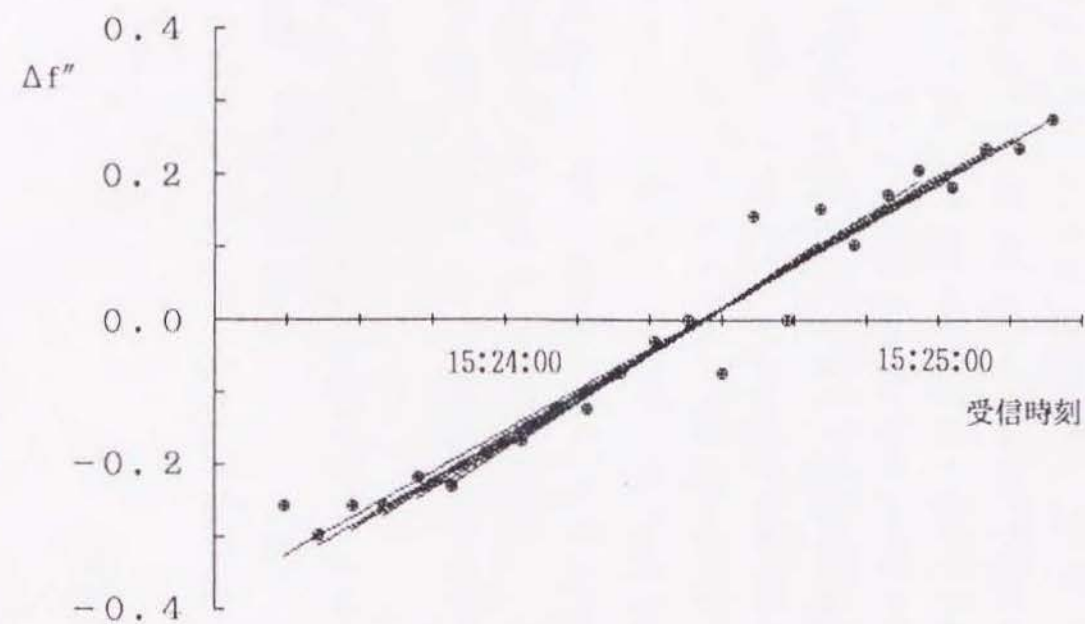


図 2 - 1 1 最接近時刻を求めるための回帰直線の一例 (高仰角)

表 2 - 1 測定時間別による最接近時刻

(高 仰 角)

測定時間 (秒)	最 接 近 時 刻	標 準 偏 差 (秒)
5 0 . 6	15:24:27.74	7 . 5 8
6 0 . 0	15:24:27.52	6 . 8 7
6 9 . 4	15:24:27.28	6 . 7 3
7 8 . 6	15:24:27.57	6 . 6 9
8 7 . 8	15:24:27.36	6 . 6 3

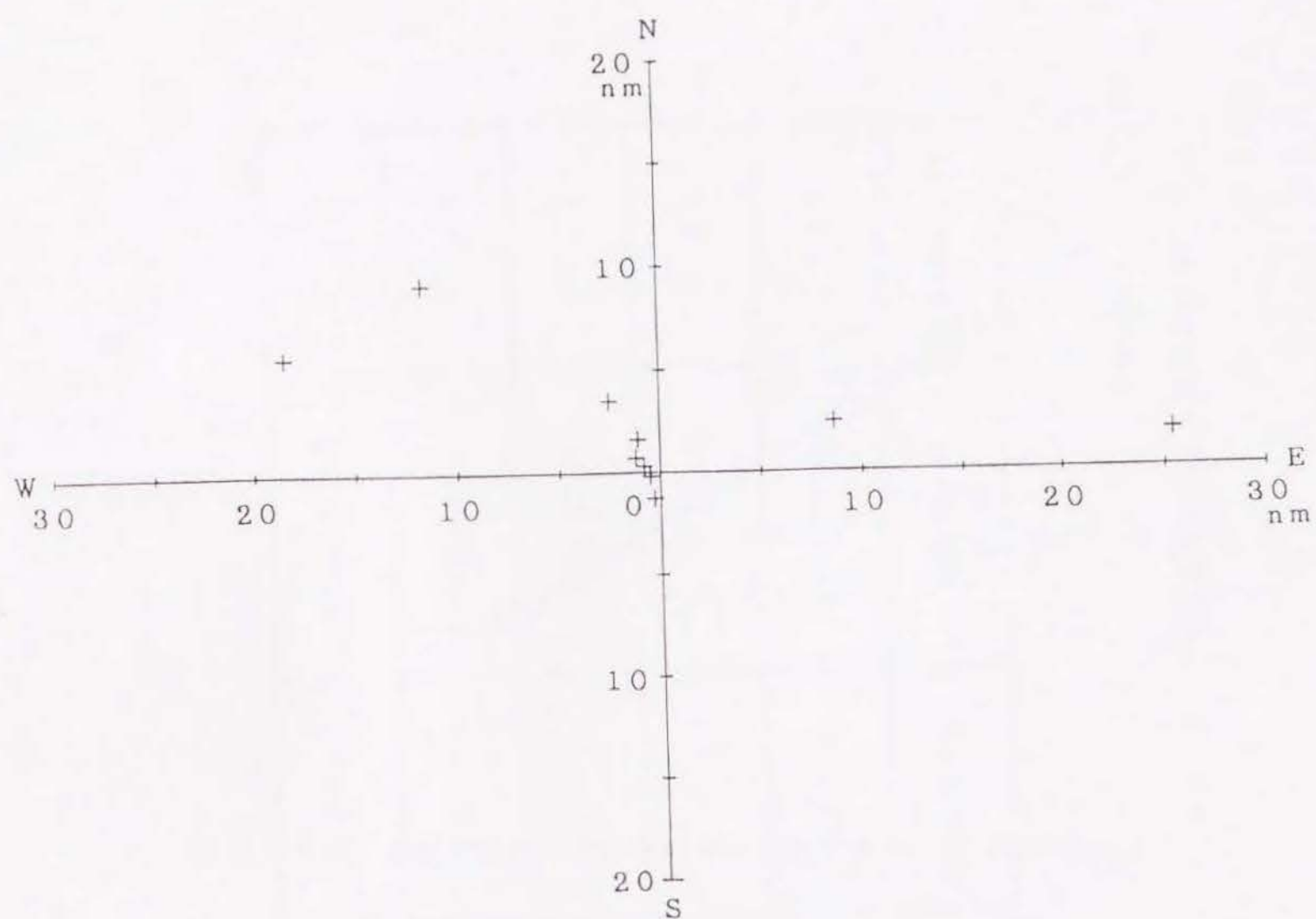


図 2 - 1 2 最接近時刻法による結果 (高仰角)

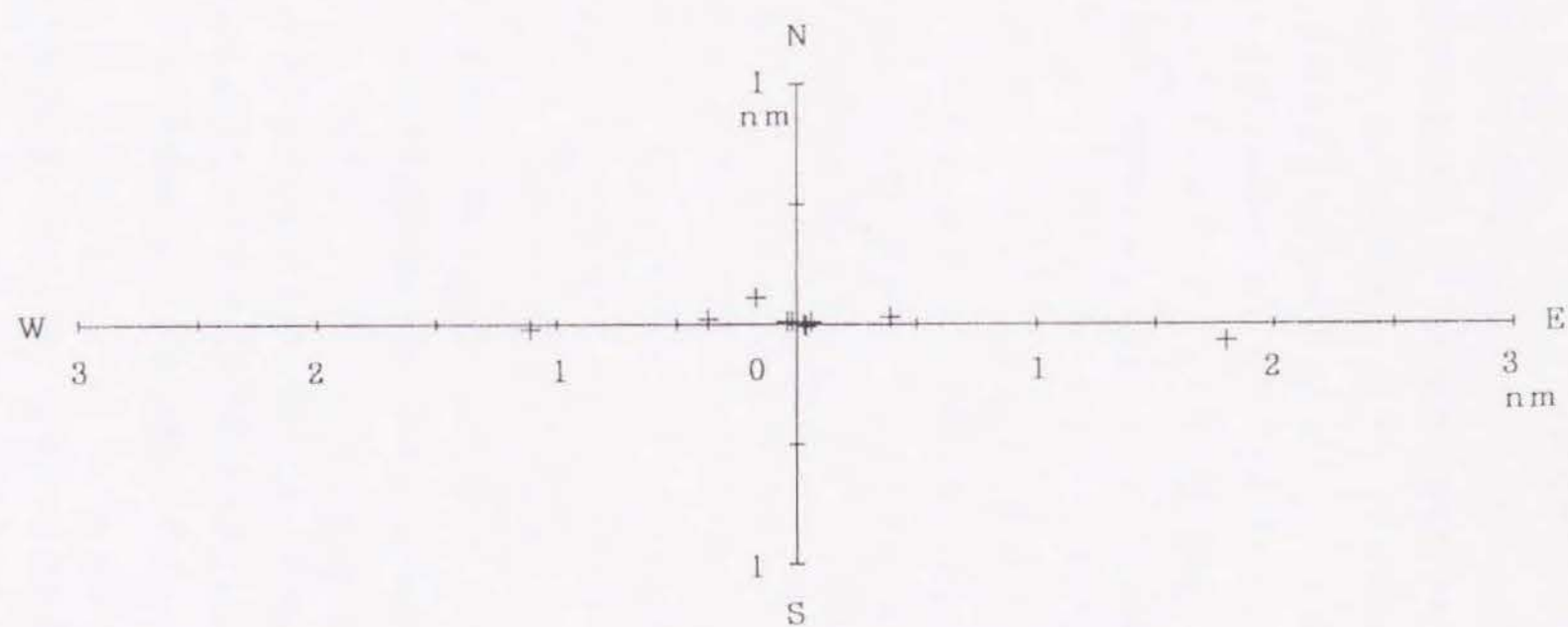


図 2 - 1 3 NNSS のアルゴリズムによる結果 (高仰角)

○ ニュートンの補間式 (3次補間)

$$\Delta f(f) = f_0 + u \cdot \Delta f_0 + u(u-1) \Delta^2 f_0 / 2! + u(u-1)(u-2) \Delta^3 f_0 / 3!$$

ここで、

f_0, f_1, f_2, f_3 : ドブラ周波数

$$u = (t - t_0) / 4.6$$

$$\Delta f_0 = f_1 - f_0, \quad \Delta f_1 = f_2 - f_1, \quad \Delta f_2 = f_3 - f_2$$

$$\Delta^2 f_0 = \Delta f_1 - \Delta f_0, \quad \Delta^2 f_1 = \Delta f_2 - \Delta f_1$$

$$\Delta^3 f_0 = \Delta^2 f_1 - \Delta^2 f_0$$

○ ラグランジュの補間式

$$\begin{aligned} \Delta f(t) = & f_0(t-t_1)(t-t_2)(t-t_3) / \{(t_0-t_1)(t_0-t_2)(t_0-t_3)\} \\ & + f_1(t-t_0)(t-t_2)(t-t_3) / \{(t_1-t_0)(t_1-t_2)(t_1-t_3)\} \\ & + f_2(t-t_0)(t-t_1)(t-t_3) / \{(t_2-t_0)(t_2-t_1)(t_2-t_3)\} \\ & + f_3(t-t_0)(t-t_1)(t-t_2) / \{(t_3-t_0)(t_3-t_1)(t_3-t_2)\} \end{aligned}$$

ここで、 $(t_0, f_0), (t_1, f_1), (t_2, f_2), (t_3, f_3)$ である。

以上の方法を検討した結果、3次曲線の場合も近似曲線であり、また、ニュートンの補間公式やラグランジュの補間式も近似的なものであって、正確な値に修正するのではないので、これらの方法が前述した回帰直線で近似する方法よりも良い方法とはならなかった。

従って、本論では最接近時刻を求める方法として、ドブラ曲線を2階微分した結果を回帰直線で近似する方法を採用した。

2. 3. 3 低仰角の場合

仰角 10° から 75° までを低仰角とし、高仰角の場合と同様にして最接近時刻を求めた。図2-14及び表2-2は、測定時間を変えて回帰直線を求め、最接近時刻を得た一例である。表中の標準偏差を表2-1と比較すると表2-2の方が大きい。これは、高仰角よりも低仰角の方が $\Delta f''(t)$ の直線部分の傾きが小さいためであり、正確な最接近時刻が決めにくいことを表している。最接近時刻法による測位結果を図2-15に示す。データ数は15個である。最接近時刻の誤差が大きいために、緯度方向の誤差が約18.0nmと大きく、経度方向では約7.6nmとなった。

この結果を推測位置として、NNSSのアルゴリズムによって再度測位計算した結果を図2-16に示す。緯度方向の誤差は約0.8nmとなり、経度方向の誤差は約0.5nmとなった。この測位誤差は、これまで解析されてきた0.2~0.3nmの測位誤差^{25), 26)}と比較すると大きくなっているが、データ数15個の中に比較的大きな測位誤差を持ったデータが入っているためである。

2. 4 まとめ

NNSSのアルゴリズムでは、仰角が高くなると経度方向の誤差は増すが、緯度方向の誤差は小さい。本論で使用したデータでは、高仰角においても比較的良好な結果が得られたが、測位誤差が大きい場合や計算が収束しない場合はデータに誤差が多く含まれていることがあるので、データの中の誤差を取り除くことができればその処理を行えば良い。その方法については第3章で述べる。

また、初期値としての推測位置は、真位置から 3° 位はずれていても収束した測位結果に差はないことを確認している。しかし、高仰角の場合は、推測位置の精度が悪いと衛星の直下軌道に対して反対の位置がでることもあるので、そのような場合も考慮すると、最接近時刻法による測位結果は数10nm以内の精度で求める必要がある。

測位誤差を比較するための一例として、極軌道衛星系EPIRBの場合を挙げ

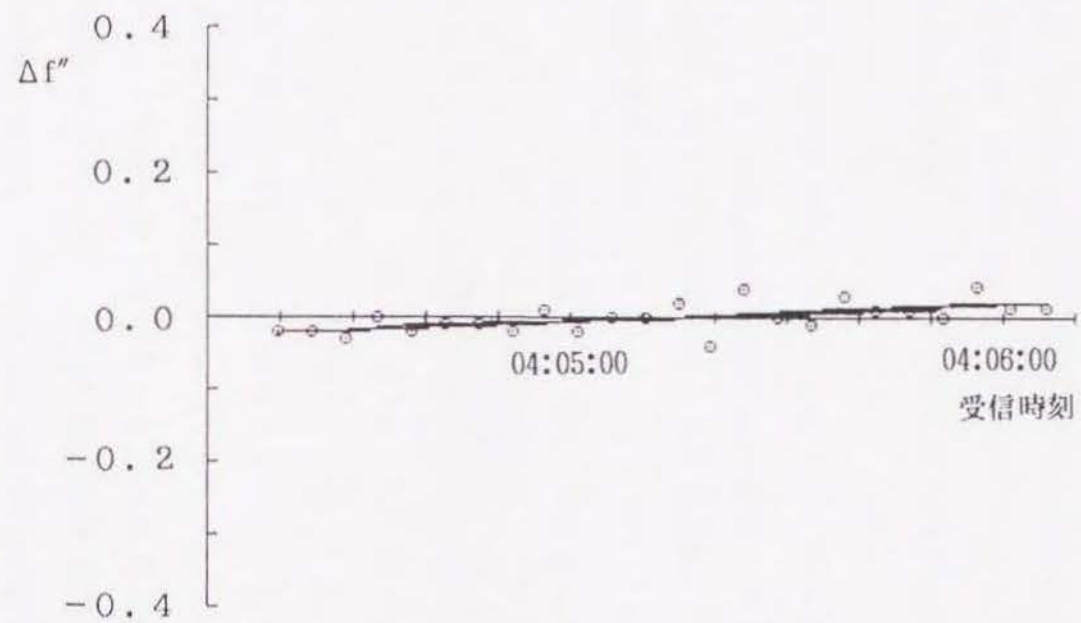


図 2 - 1 4 最接近時刻を求めるための回帰直線の一例 (低仰角)

表 2 - 2 測定時間別による最接近時刻
(低仰角)

測定時間 (秒)	最接近時刻	標準偏差 (秒)
50.6	04:05:09.02	40.03
59.8	04:05:09.02	42.44
69.0	04:05:10.44	40.02
78.2	04:05:10.82	55.98
87.6	04:05:08.75	39.10

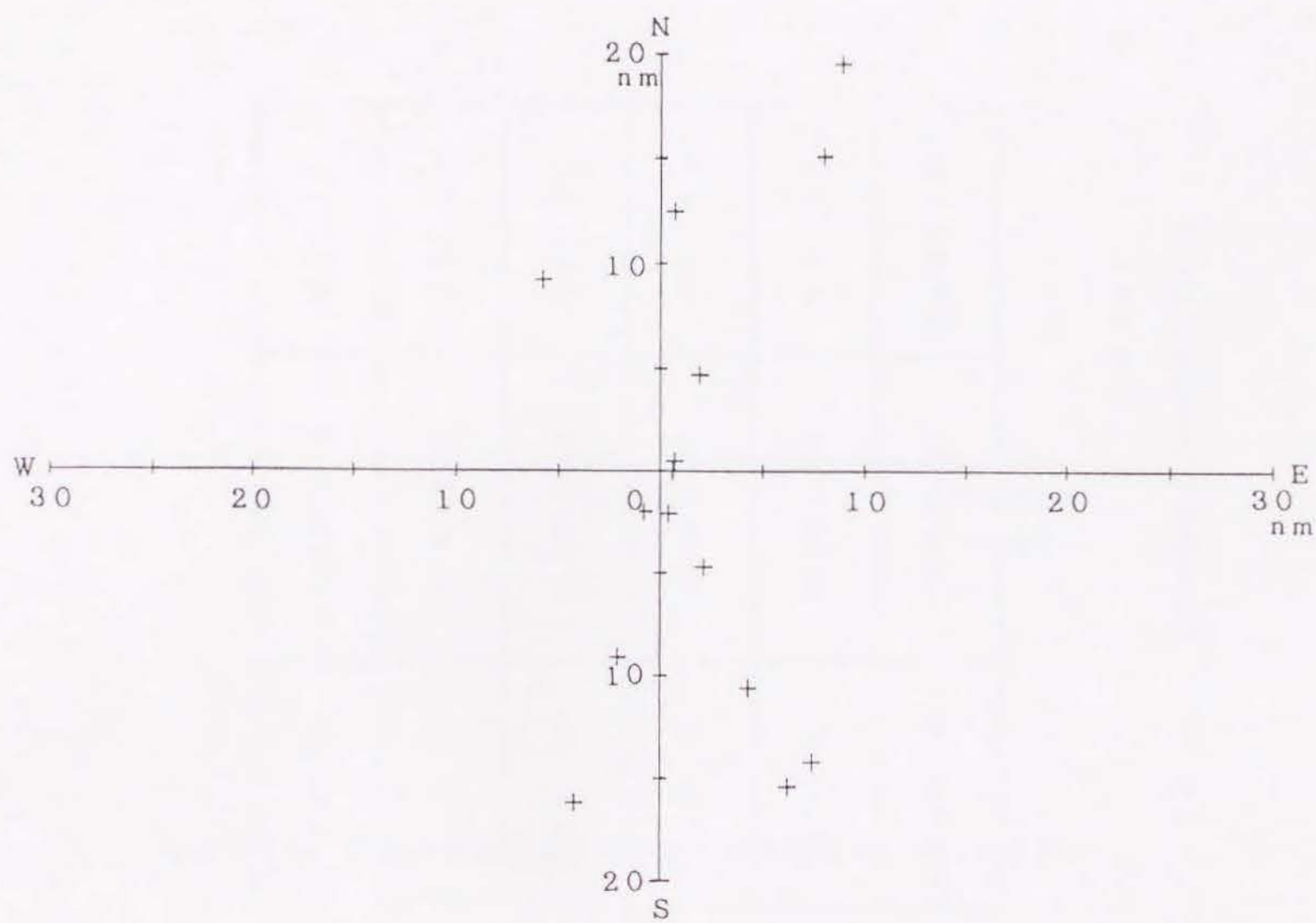


図 2 - 1 5 最接近時刻法による結果 (低仰角)

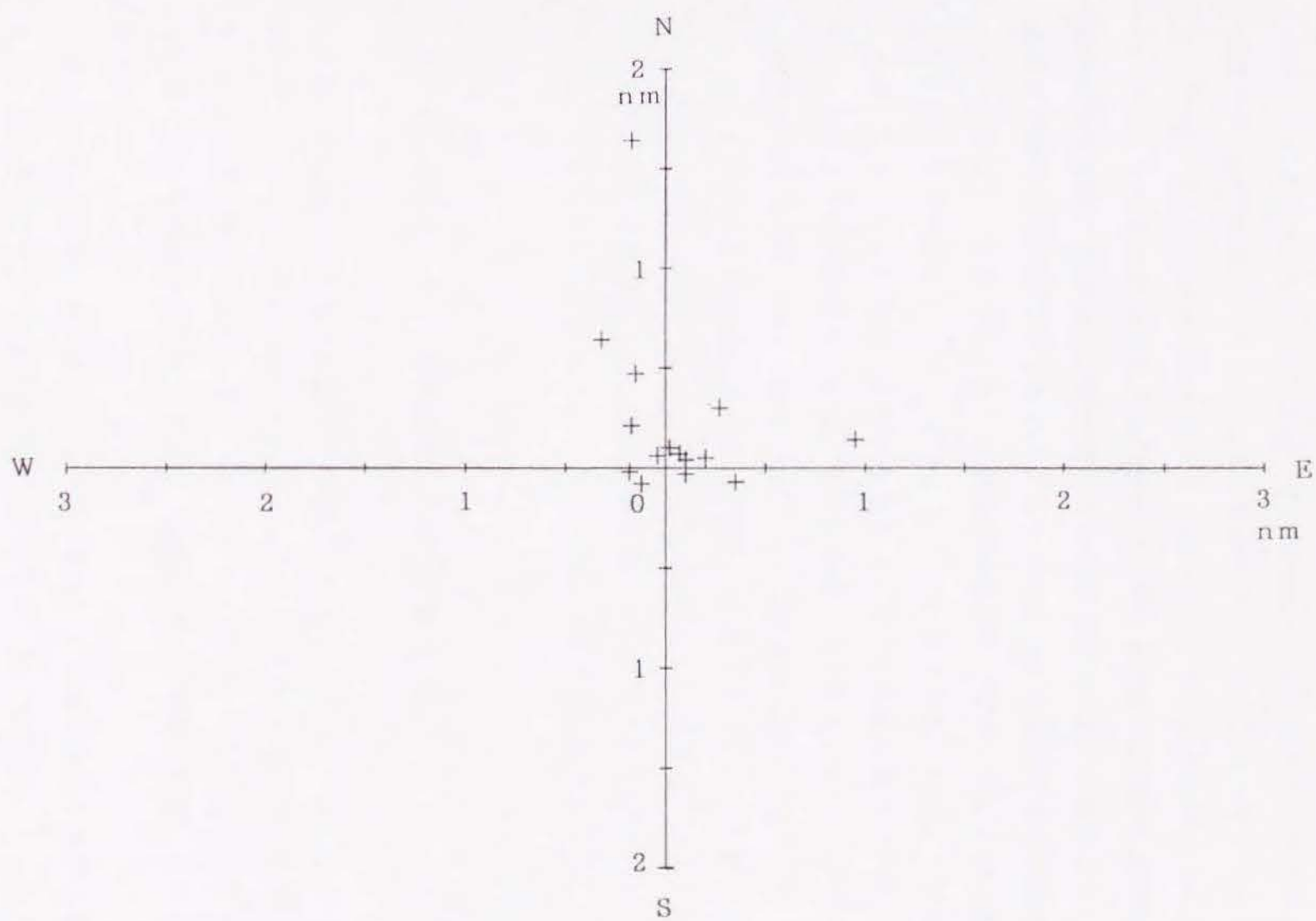


図 2 - 1 6 NNSS のアルゴリズムによる結果 (低仰角)

る。EPIRBは測位誤差が2.7nm(90%確率)⁵⁸⁾とされているので、それと比較すると高仰角の場合でも1.6nm位も精度が向上する。しかし、NNSSから得られるドプラデータとEPIRBから得られるドプラデータとでは、周波数の安定度による条件が異なるので、この値がそのまま測位精度の向上につながったとは言えない。周波数の安定度に関しての解析は第4章で述べる。

なお、EPIRBの測位誤差が90%確率で言われているので、本論でも90%確率で以下の測位誤差を表すこととする。また、高仰角及び低仰角の実測データは以下の章でも同じデータを使用して解析した。

第3章 電波屈折による測位誤差

3.1 はじめに

NNSS方式の人工衛星は、高度が1000km位あるので、電波は電離層、自由空間、及び対流圏を通過して伝搬して来ることになる。これらの層では電子密度や誘電率が変化しているので電波は屈折する。電波が屈折すると電波経路長が増加することになり、衛星と測位点との距離が実際よりも長くなることになる。このことを図で示すと図3-1⁶²⁾のようになり、衛星は実際の軌道よりも高い高度を周回していることになる。距離の増加量は全電子含有量と衛星の仰角に左右される。その量は400MHz電波で昼間の中緯度の電子含有量を $8.5 \times 10^{17} \text{el/m}^2$ とすると仰角90°で約200m、仰角0°で約800mになる。この関係は図3-2⁶²⁾のようになる。この屈折による電波経路長の増加が測位に影響を及ぼし、その誤差は仰角が70°を越すと数kmになる⁶²⁾との計算がある。しかし、この値は実際よりも幾分大きくでているようなので、ここでは実測に基づいた結果を示すことにし、併せて電波屈折の影響を少なくする方法を考え、測位精度の向上をはかった。

3.2 電波屈折がドプラ周波数に及ぼす影響

実測した極軌道型衛星の軌道直下の軌跡を示すと図3-3(a)及び(b)⁵⁰⁾のようになり、10°Nから60°Nにわたっている。(a)は北上軌道、また(b)は南下軌道の時の図示である。受信位置は34° 15.12' N、133° 12.42' Eである。このように、電波は一回の測位で電子密度の異なった空間を伝搬してくることになる。

電波屈折による電波経路長の増加がない場合のドプラ周波数と実際に観測したドプラ周波数の差を、電波屈折がドプラ周波数に及ぼす影響⁵⁷⁾として示すことにした。図3-4(a)は、最大仰角が85°で衛星が北上した場合の結果を示している。実測のドプラカウントが約4.6秒間なのでそれをドプラ周波数に直して図示している。受信始めの方がドプラ周波数に及ぼす影響が大きく、これは電子

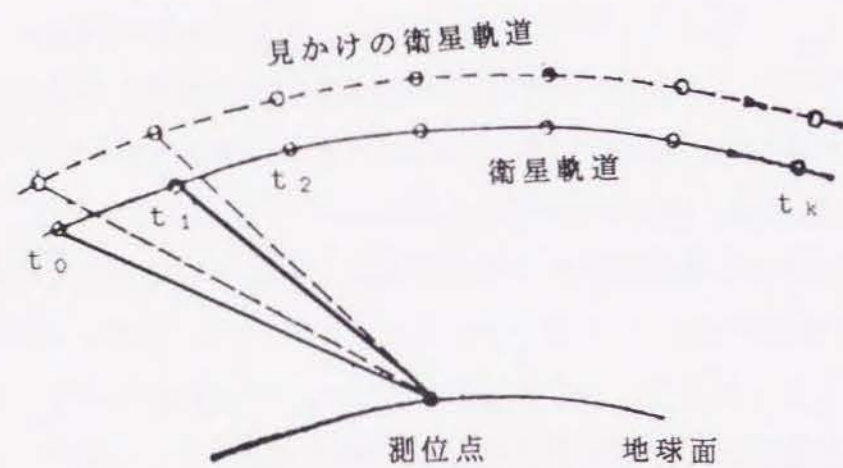


図 3 - 1 電波屈折による衛星の見かけの位置

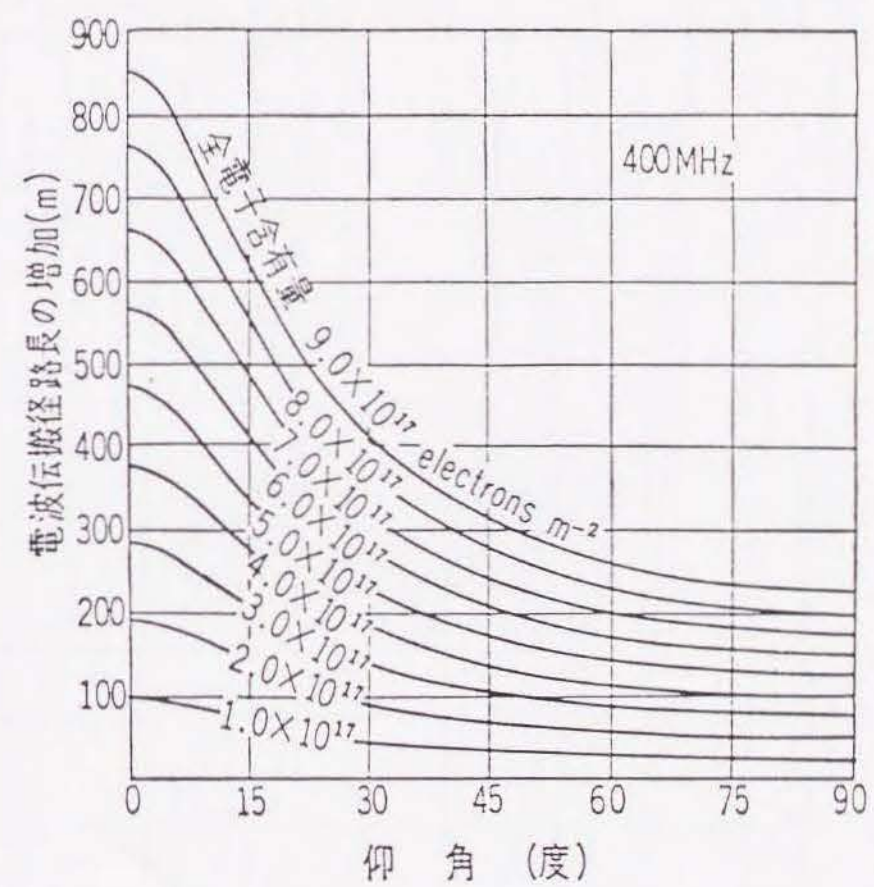
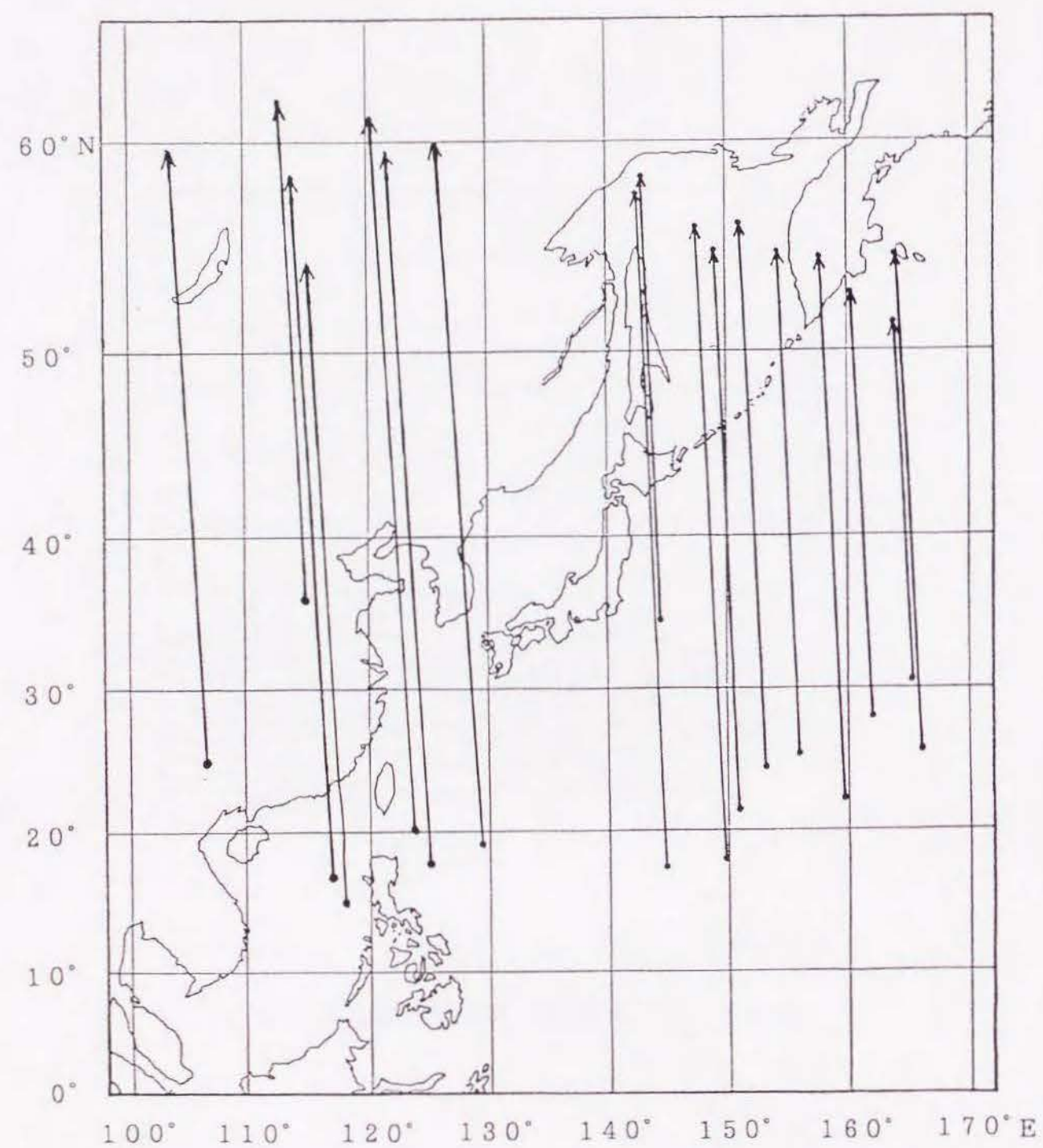
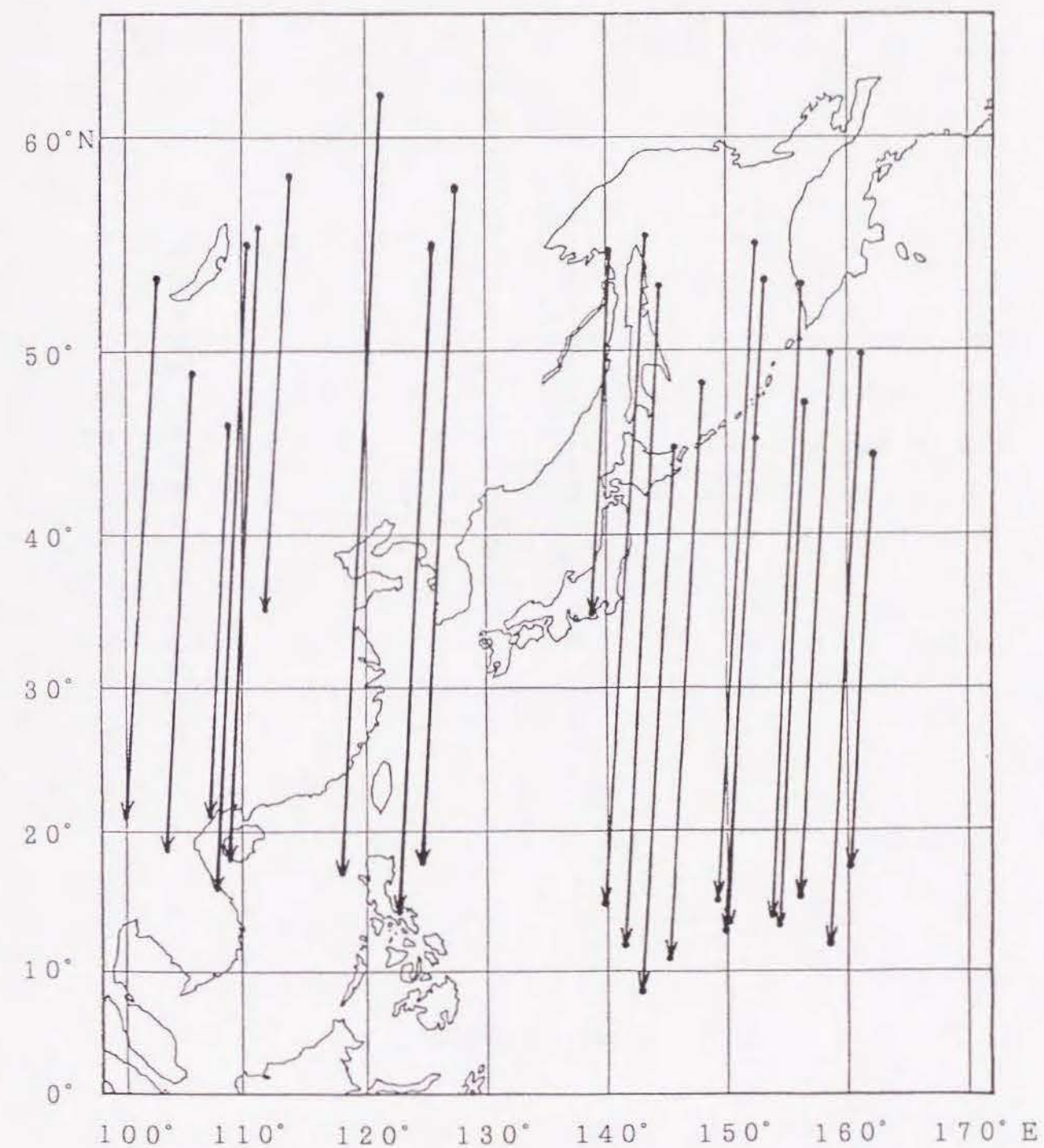


図 3 - 2 電離層による電波経路長の増加⁶²⁾



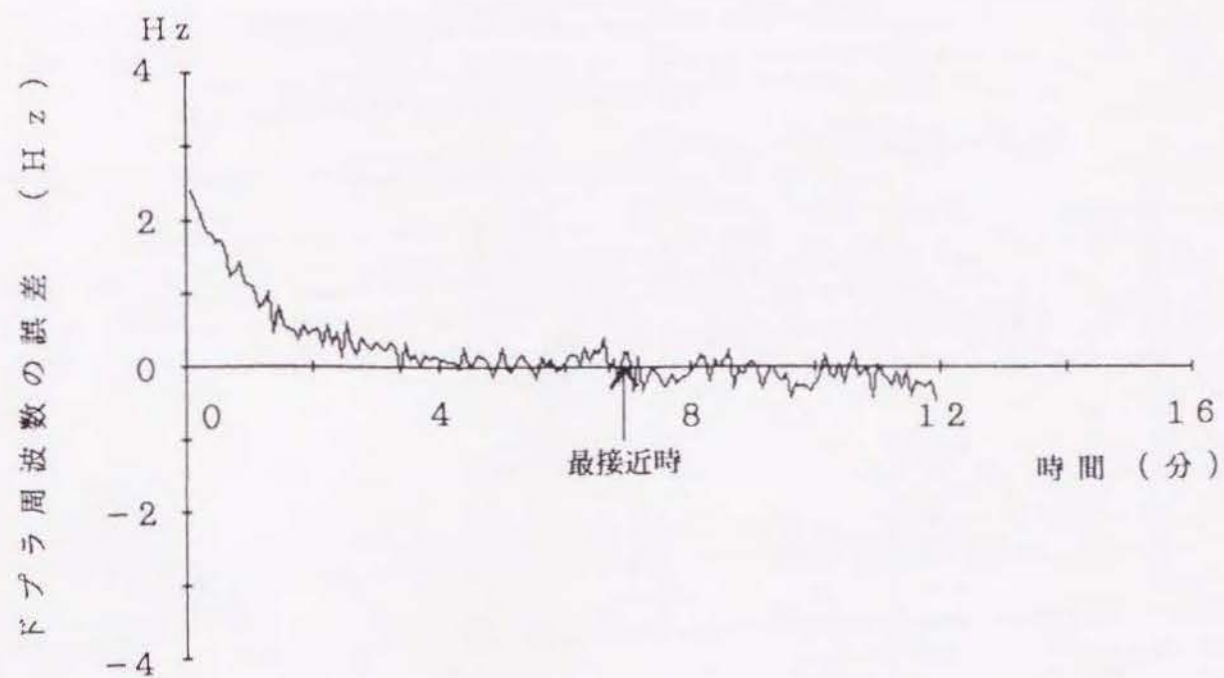
(a) 北上軌道

図3-3 極軌道型衛星の軌道直下点の軌跡



(b) 南下軌道

図3-3 極軌道型衛星の軌道直下点の軌跡



(a) 北上軌道

図 3 - 4 電波屈折がドプラ周波数に及ぼす影響

密度の高い南方を経由して来たためである。図3-4(b)は衛星が南下したときのものである。北上の場合と同じ理由で、受信の終わりの方の影響が大きくなってきている。また、図3-5(a)及び(b)は縦軸に仰角をとって図示したものである。仰角が高くなるにしたがってドブラ周波数に及ぼす影響が小さくなっていることが分かる。

3. 3 電波屈折による測位誤差

3. 2の項で示した電波屈折によるドブラ周波数の影響が測位誤差を生じさせることになる。この測位誤差は、ドブラカウントに電波屈折による誤差が加わることによって生ずるもので、NNSのアルゴリズムでは、実測距離にその誤差が生じることになり、測位計算の結果、緯度、経度、及び周波数差の誤差となって現れてくる。

電波屈折の影響を取り除く方法としては、2波受信の方法がある。NNSでは400MHzと150MHzの両周波数を使って次式のような数学処理を行うと、電離層内の電波の屈折による測位誤差のほとんどを補正⁶³⁾することができる。

$$f_{CR} = f_{HR} - (8/3 \cdot f_{LR} - f_{HR}) \cdot 9/55 \quad (3-1)$$

ここで、

f_{CR} : 電離層屈折誤差補正後のドブラカウント値

f_{HR} : 400MHz帯のドブラカウント値

f_{LR} : 150MHz帯のドブラカウント値

そこで、2波受信による測位結果と1波受信による測位結果との差を電波屈折の影響による測位誤差として、実測の結果を示したものが図3-6⁴⁹⁾である。90%確率で緯度方向の誤差が約0.2nm、経度方向が約0.4nmとなった。なお、この結果は仰角が10°から75°までの低仰角の場合である。

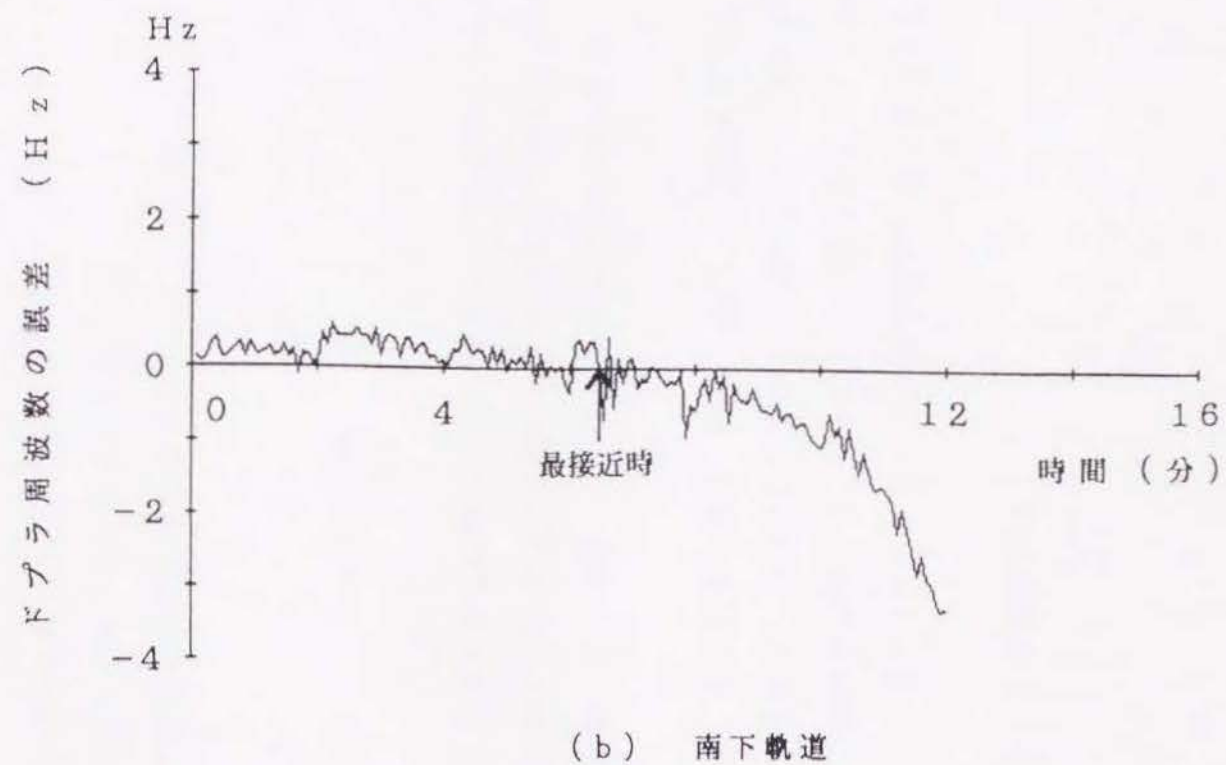
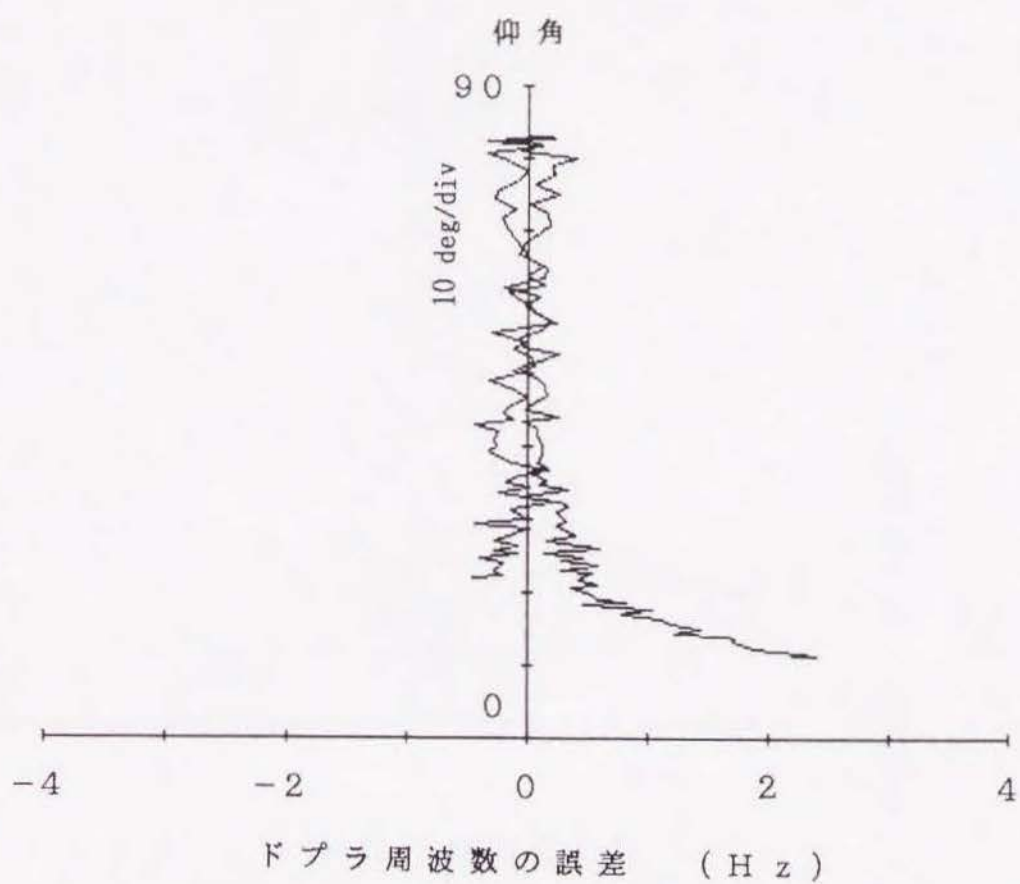
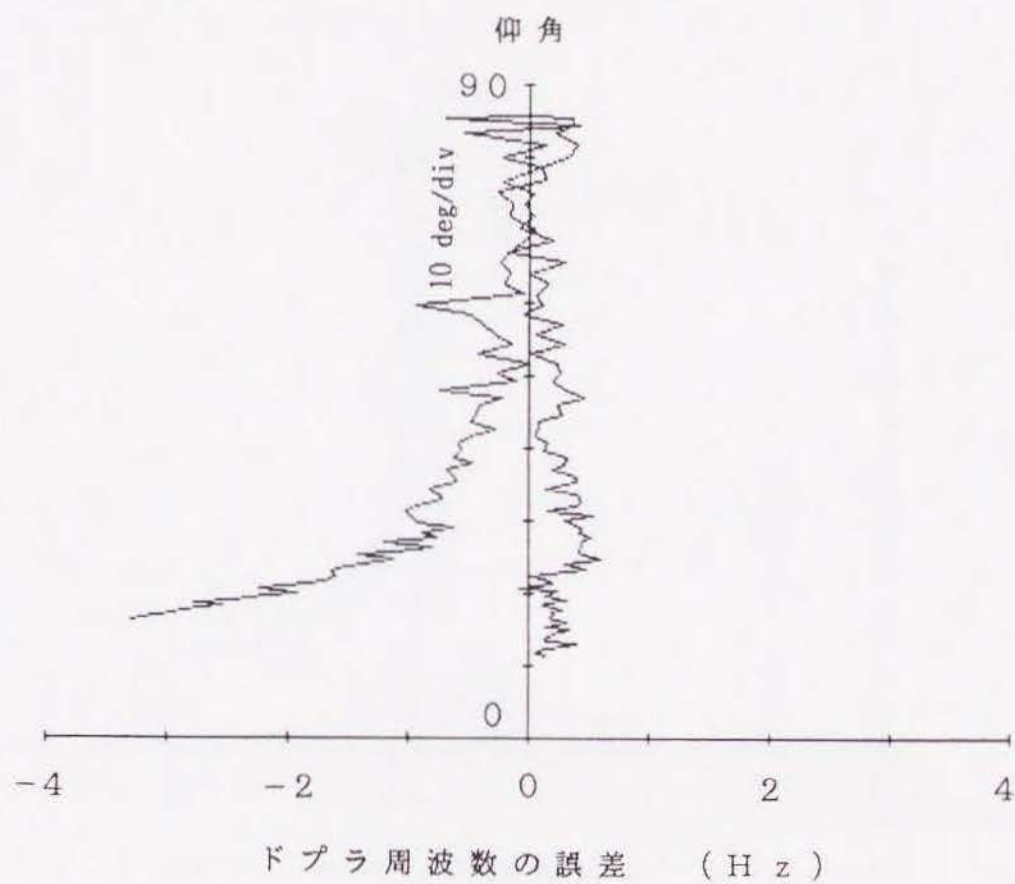


図 3 - 4 電波屈折がドプラ周波数に及ぼす影響



(a) 北上軌道

図 3 - 5 電波屈折がドプラ周波数に及ぼす影響を仰角でみた場合



(b) 南下軌道

図 3 - 5 電波屈折がドプラ周波数に及ぼす影響を仰角でみた場合

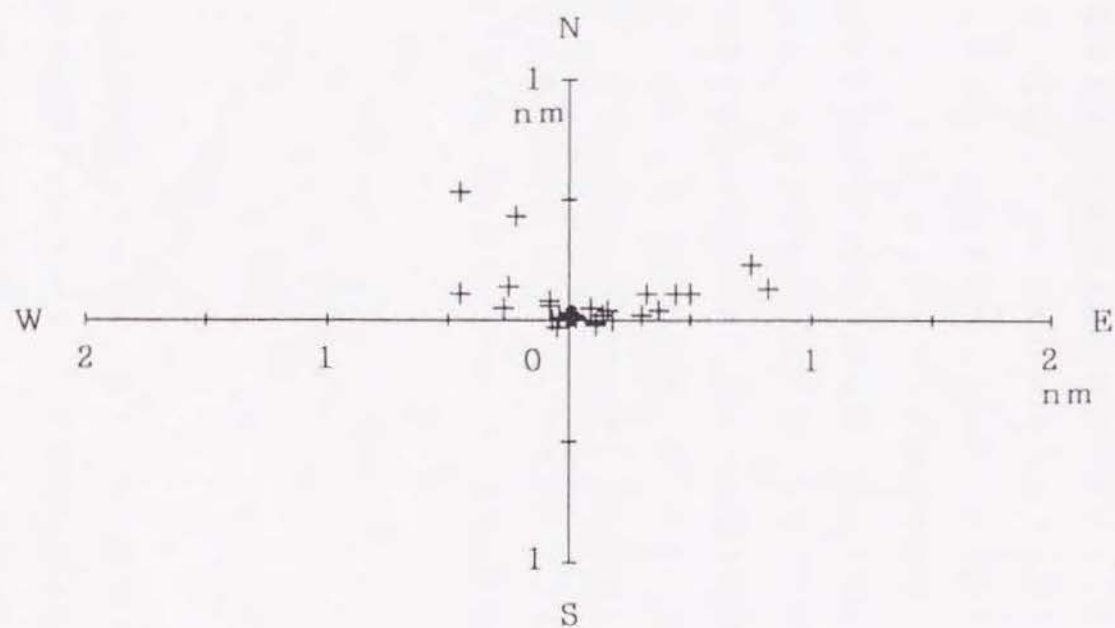


図 3 - 6 電波屈折による測位誤差

3. 4 測位置に及ぼす電波屈折の影響を少なくする方法

NNSSのアルゴリズムでは仰角が高いと経度方向の誤差が増したり、計算が収束しなかったりする。これは、位置の線が平行近くになって交わるため、僅かのデータの誤差でも測位誤差が大きく生じる。

そこで、ドブラカウムの測定誤差が測位計算に与える影響を少なくするために、ドブラ測定時間を検討した。前述の図3-4及び図3-5より最大仰角付近つまり最接近時刻付近のドブラカウムの誤差は少なくなることが分かったので、最接近時刻付近を挟んで測定時間を決めることにした。

その結果、2分間ドブラ方式では最低6分間の測定時間が必要なので、測定時間を6分間にしてNNSSのアルゴリズムで測位計算を行った。そのときの高仰角の場合の測位誤差結果を図3-7に、また低仰角の場合を図3-8に示す。これらの計算に用いたデータは、第2章で使ったものと同じもので、推測位置も第2章で計算した最接近時刻によるものである。表3-1は、そのときの統計処理結果である。受信できたドブラカウムデータをすべて使った場合と比較すると、高仰角では経度方向の誤差が0.8nmも減り、低仰角では緯度方向で0.5nm、経度方向で0.2nm減っている。

3. 5 まとめ

電波屈折による測位誤差を少なくするためには、誤差の少ないドブラカウムデータを使って測位計算をすれば良い。高仰角では最接近時刻付近のドブラカウムには余り誤差が含まれていないので、最接近時刻を挟む6分間のドブラ測定時間で測位計算することにより、受信したすべての測定時間のドブラカウムデータを使用するよりも経度方向で0.8nmも精度の良い測位結果となった。

一方、低仰角の場合もこの方法を採用することにより普通言われている0.3nm程度の測位精度になったが、最接近時刻付近のドブラカウムには高仰角の場合よりも誤差が多く含まれているので、測定時間を6分間にしても測位精度は余り向上しないものと考えられる。しかし、誤差の大きな測位結果がでた場合、最接

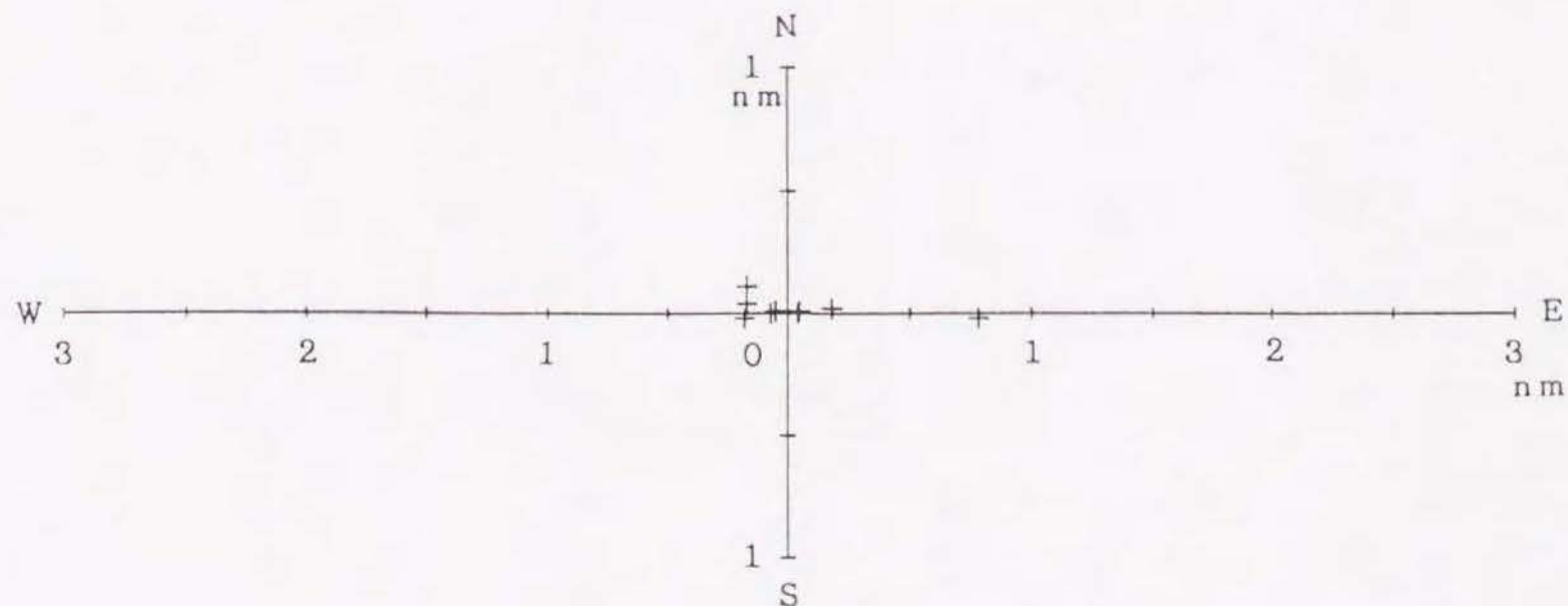


図 3 - 7 N N S S のアルゴリズムによる結果
(高仰角、測定時間 6 分間)

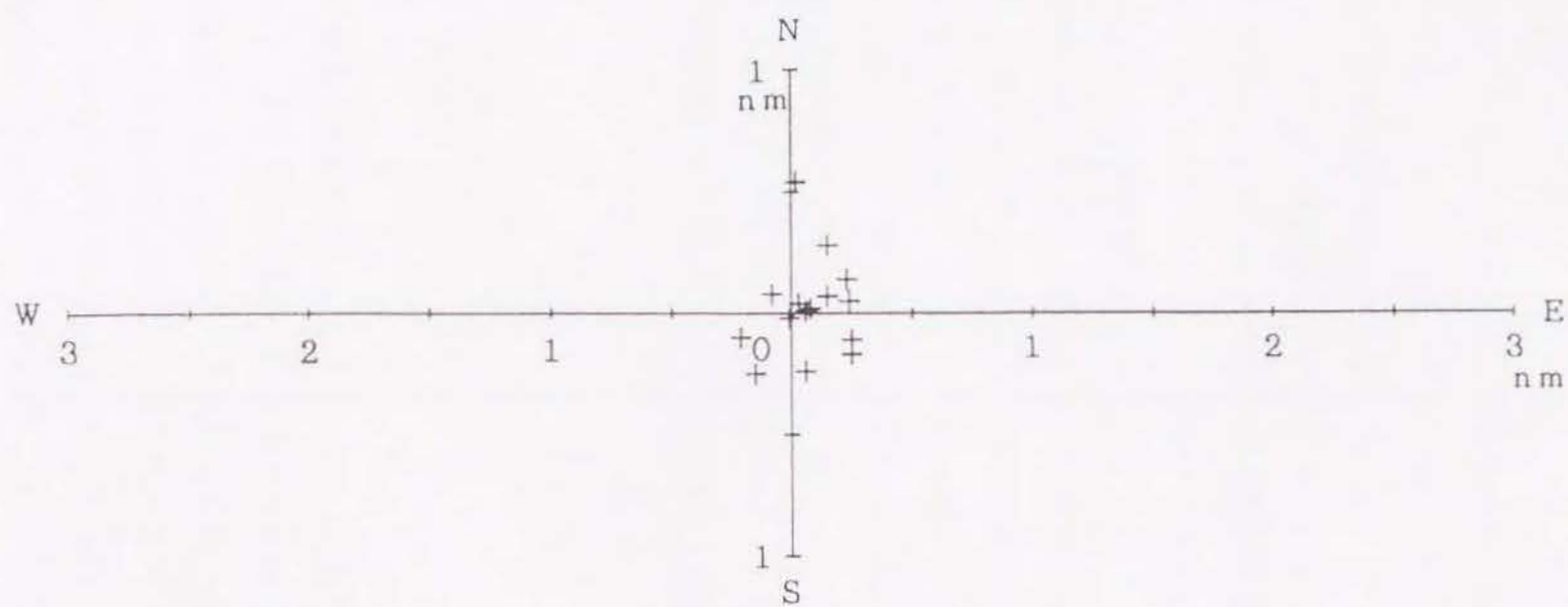


図 3 - 8 N N S S のアルゴリズムによる結果

(低仰角、測定時間 6 分間)

表 3 - 1 測定時間 6 分間のときの測位誤差

仰 角	測 位 誤 差 (9 0 % 確 率)	
	緯 度 方 向 (n m)	経 度 方 向 (n m)
高 仰 角	0 . 1	0 . 3
低 仰 角	0 . 3	0 . 3

近時刻付近を挟む6分間程度のデータを使用することによって、測位結果が改善されることがあるという点は注目すべきである。

測定時間でドプラカウントデータの数を決める方法の他に、衛星の仰角によって決める方法も考えられる。受信仰角を何度以上と決めておけば測定時間でドプラカウントデータの数を決めた場合と同じような結果となる。但し、この場合は推測位置からの仰角であり、高仰角の場合は推測位置の僅かな差でも仰角の差は大きく、そのためドプラカウントデータの数に大きな差が生じる。

本章によって、測位計算に用いるドプラ測定時間を最接近時刻を挟んだ6分間位にすると、電波屈折が原因となる誤差をある程度除去できることになり、測位精度の向上がはかれることがわかった。

第4章 送信周波数が増加した場合の測位誤差

4.1 はじめに

衛星系EPIRBやARGOSのようなシステムでは、測位対象物に取り付けられた送信機から発信された周波数は若干変化^{16), 58)}する。このことがEPIRBやARGOSシステムにおける測位誤差の大きな原因となっている。NNSの測位計算でも、前述したように送信周波数は一定としたアルゴリズムなので、受信中に送信周波数が増加するとドプラカウントにその影響が生じ、測位誤差につながる⁵⁷⁾ことになる。

図4-1では送信周波数が増加したときのドプラ曲線を模式的に示している。送信周波数が一定のときのドプラ曲線と平行であれば、NNSのアルゴリズムでは測位誤差は生じないが、図のように変化する場合には測位誤差が生じる。

この章では送信周波数が増加した場合の測位誤差について解析する。

4.2 シミュレーションによる結果

衛星系EPIRBやARGOSシステムなどでは、システムの要求として、送信周波数の安定度の規格がある。その一つに中期安定度の平均傾斜という項目があり、EPIRBでは 1×10^{-9} /分という値^{16), 58)}が示されている。そこで、ここでは送信周波数を 1×10^{-9} /分の割合で増加させ、NNSのアルゴリズムによる測位誤差をシミュレーションによって計算した。

シミュレーションで使用するドプラカウント値は次式によって求めた。

まず、送信周波数が一定の場合のドプラカウント値は次式で求められる。

$$N_k = (Dc_k + t \cdot f_0 \cdot L_0) / L_0 \quad (4-1)$$

ここで、

N_k : ドプラカウント値

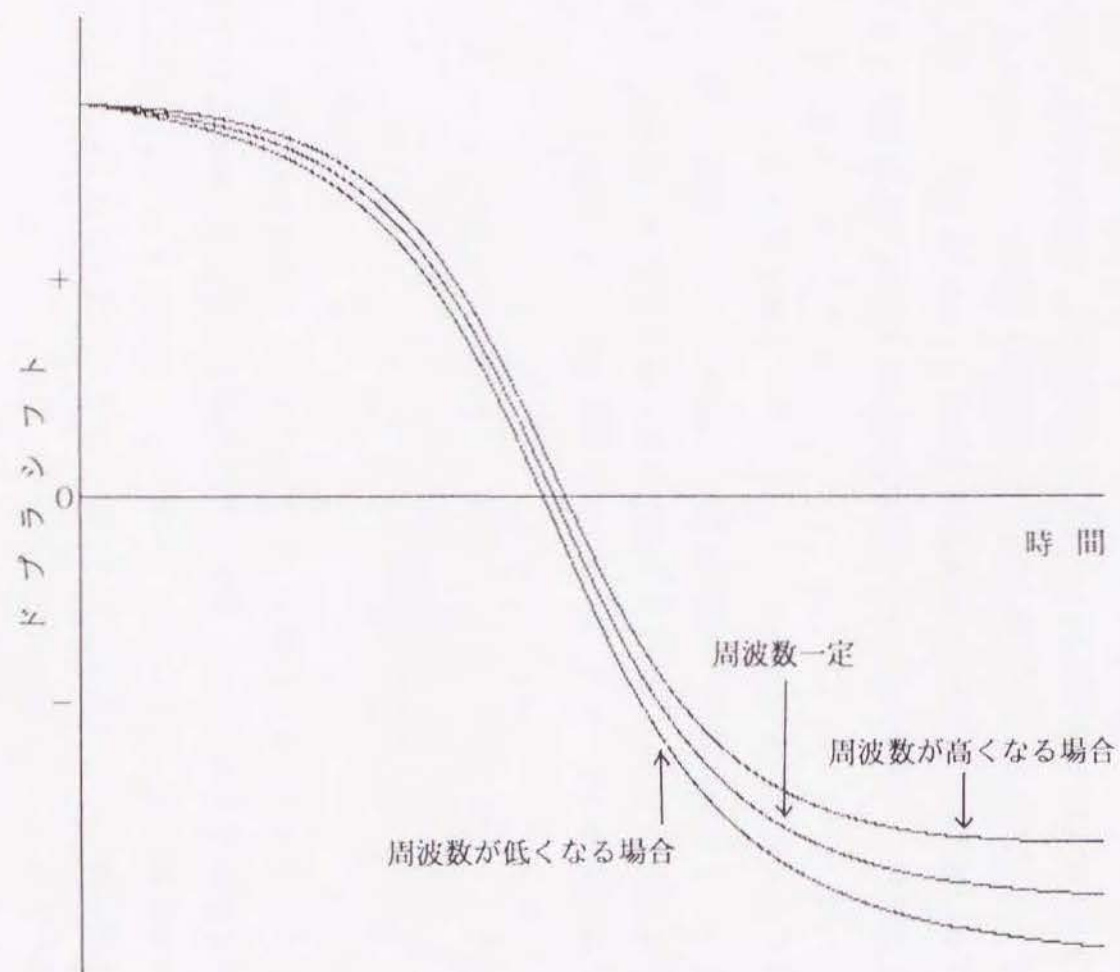


図 4 - 1 送信周波数が変化したときのドプラ曲線

Dc_k : t 時間ごとの測位点と衛星の距離の変化

t : ドブラカウントをする時間

f_0 : 基準周波数と送信周波数との差

L_0 : 周波数の波長

次に、送信周波数が増えるということは、 f_0 が増えるということになるので、上式の f_0 に周波数の変化分を加減した。従って、送信周波数が増えたときのドブラカウント値 N_k' は次式で求めることができる。

$$N_k' = \{Dc_k + t \cdot (f_0 \pm 1 \times 10^{-9} / 60 \cdot f_T) \cdot L_0\} / L_0 \quad (4-2)$$

ここで、

f_T : 送信周波数

また、4-2式の中の±の符号は、+の場合が送信周波数が低くなることを表し、-は高くなることを表す。なお、周波数の波長も変化するがその値は小さいので、ここでは一定とした。

上式でドブラカウント値を求め、衛星の仰角ごとに測位誤差を計算した。計算に用いる各要素の緒言は次のようにした。

計算に用いる各要素の緒言

f_0 : 32000 Hz

f_L : 399.968 MHz

衛星軌道の6要素

長半径 : 7459.61 km

離心率 : 0.001941 km

近地点通過時間 : 395.7843 min

昇交点経度 : 220.4686 deg

近地点引数 : 166.0464 deg

傾斜角 : 89.6685 deg

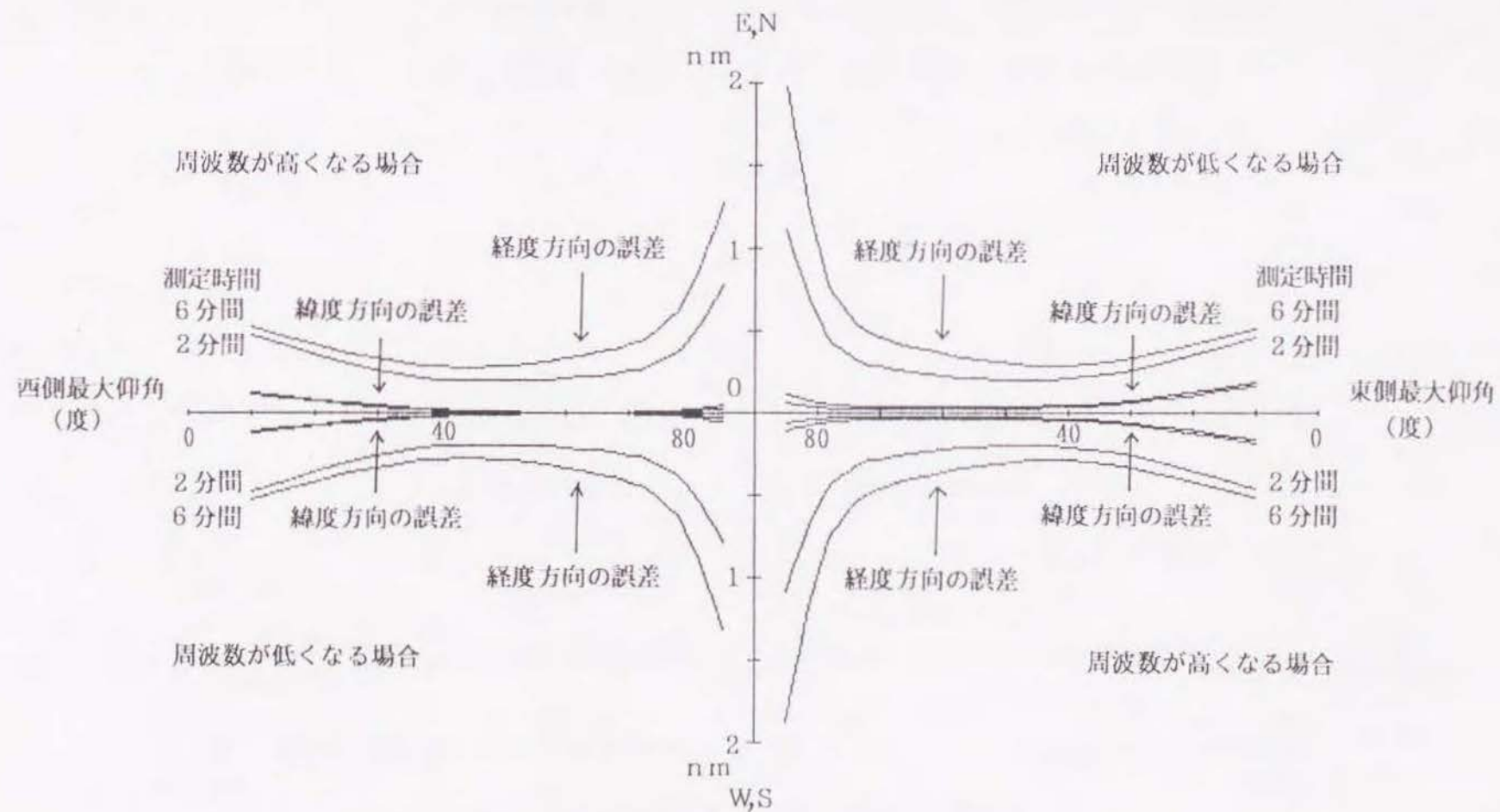
このような緒言の値を用いて計算した測位誤差結果を図4-2(a)及び(b)に示す。それぞれ衛星が北上した時、南下したときのものである。送信周波数が高くなるときと低くなるとき、また計算に使用する測定時間を6分間にした場合と2分間にした場合とを示している。測位点の緯度は 34°N である。緯度方向の誤差は測定時間及び仰角でみてもそれほど大きくはないが、経度方向の誤差は測定時間が長くなると大きくなり、さらに仰角が高くなると急激に増加する。なお、北上軌道と南下軌道の測位誤差は図で言えば左右反対、つまり東西の最大仰角における測位誤差が反対になっている。

4. 3 高仰角の時の測位誤差

NNSSのアルゴリズムで、送信周波数が増加する場合、実測の測位結果はどのようなになるかを解析した。仰角が 75° から 85° までの実測ドプラカウント値に、送信周波数が増加することによって生ずる余分のカウント値を加減した。衛星からの送信周波数は長期的には僅かずつ変化しているが、ここでは 399.968MHz とした。また、送信周波数が増加する割合は、シミュレーションの場合と同じように $1 \times 10^{-9}/\text{分}$ とした。測定時間は、第3章の解析により、電波屈折の影響を軽減するには6分間程度が良いとの結果がでたので、最接近時刻付近を挟む6分間とした。また、推測位置が真位置から 3° 程度異なっても、計算の収束する回数が異なるだけで、収束した測位結果は同じなので、推測位置は最接近時刻による方法で求めた結果を用いた。

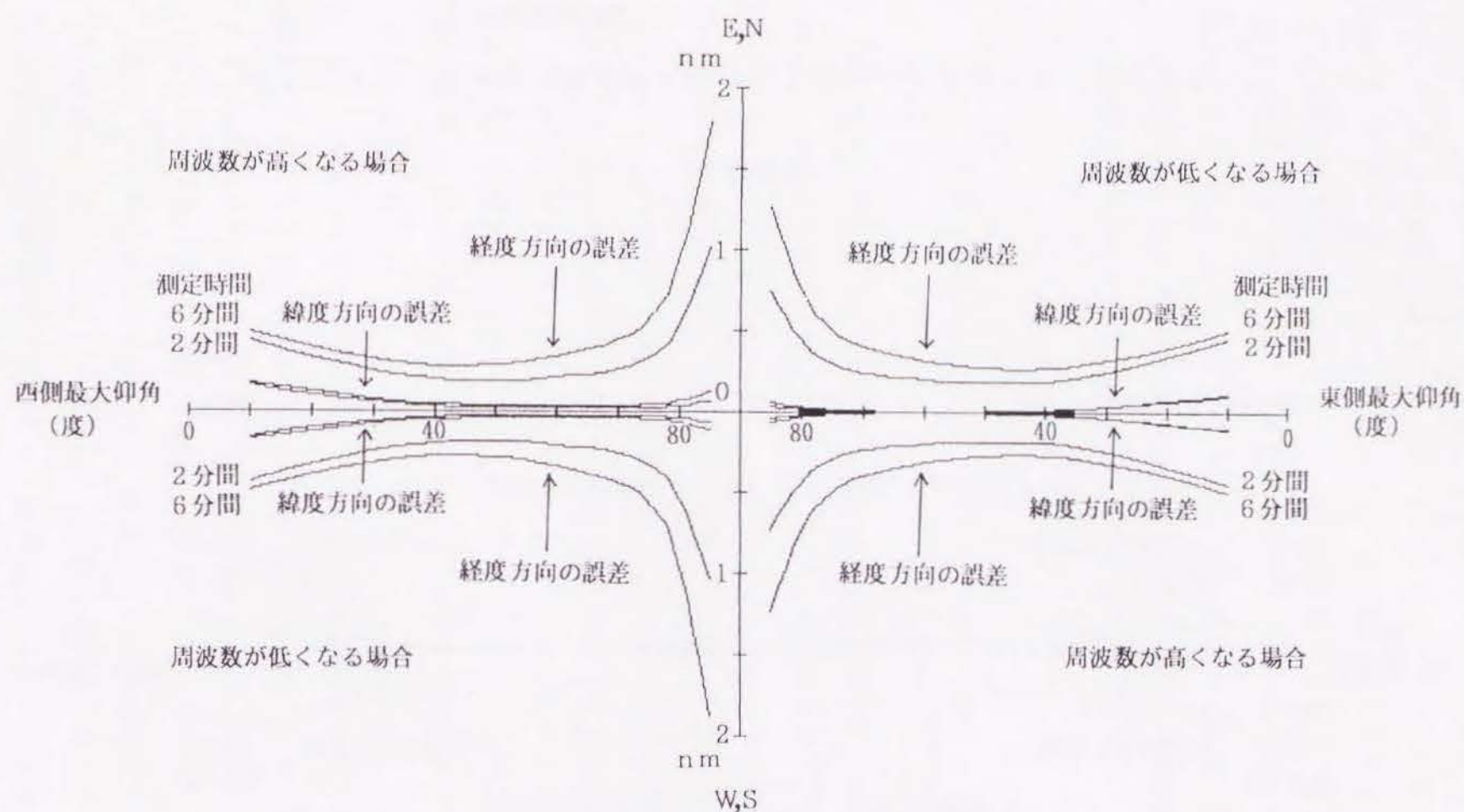
図4-3にその測位結果を示し、表4-1に統計結果を表す。図中、 \square は送信周波数が高くなる方に变化した場合の測位結果であり、 \odot は送信周波数が低くなる場合の測位結果である。緯度方向の誤差は、高仰角、低仰角ともそれ程増えていないが、経度方向では大きく増加している。

また、送信周波数が高くなる場合の方が 2.3nm と測位誤差が大きくなっているが、前項のシミュレーションの結果では、送信周波数が低くなる時よりも高くなる時の方が測位誤差が増すという結果は見られない。周波数の変化によって、測位結果がどのように変移するか図示したものが図4-4である。この図は、送



(a) 北上軌道

図4-2 送信周波数に変化したときのNNSSのアルゴリズムによる測位誤差



(b) 南下軌道

図4-2 送信周波数に変化したときのNNSSのアルゴリズムによる測位誤差

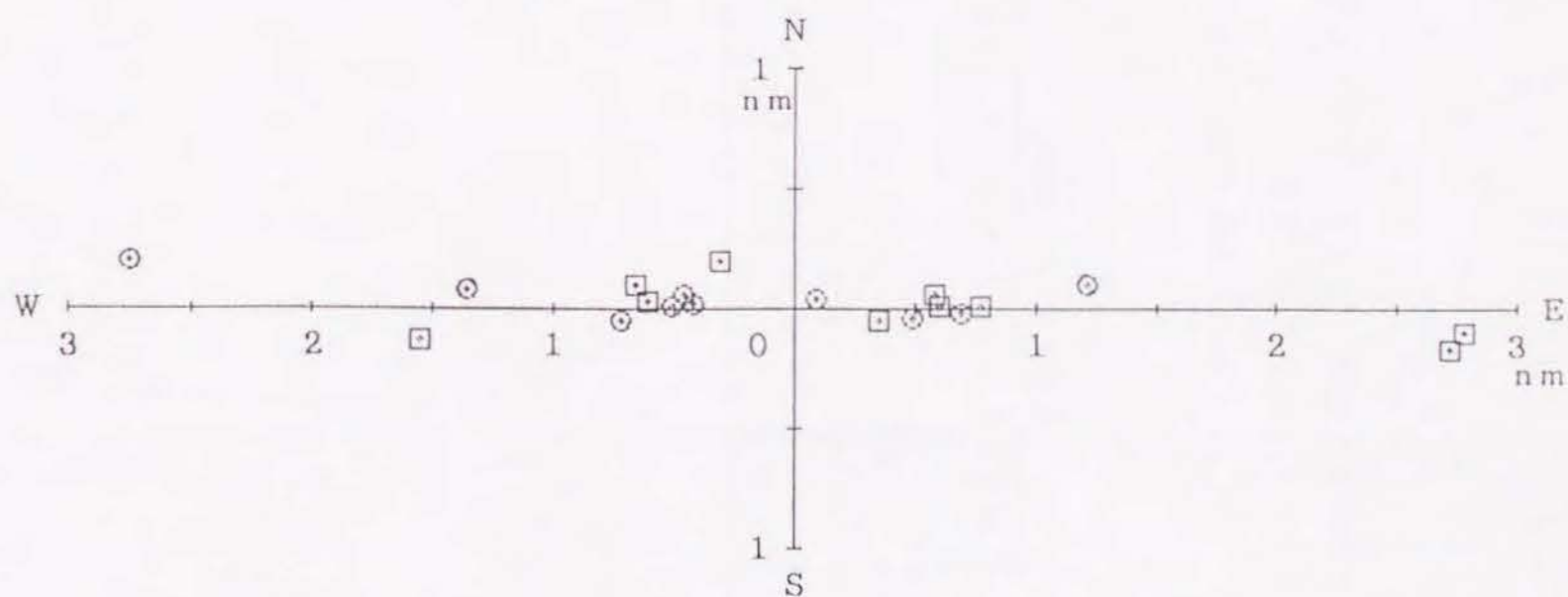


図4-3 送信周波数に変化したときのNNSSのアルゴリズムによる結果 (高仰角、測定時間6分間)

□: 送信周波数が高くなった場合

○: 送信周波数が低くなった場合

表 4 - 1 送信周波数が変化したときの N N S S の
アルゴリズムによる統計結果
(高仰角、測定時間 6 分間)

送信周波数	測位誤差 (90%確率)	
	緯度方向 (nm)	経度方向 (nm)
高くなる場合	0.2	2.3
低くなる場合	0.1	1.9

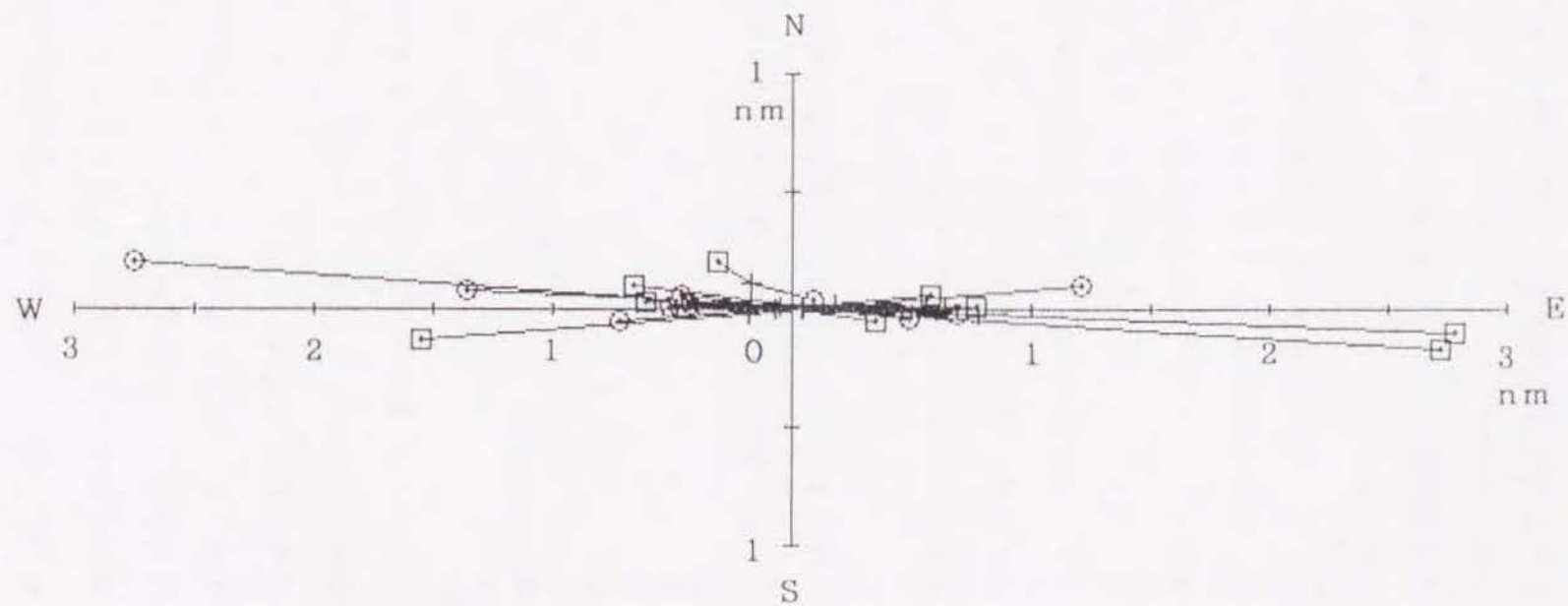


図 4 - 4 送信周波数が一定のときの結果と変化したときの結果

送信周波数が一定のときの測位点から、周波数が変化したときの測位点までを実線で結んである。これを見ると、送信周波数が一定の測位点を中心にして東西反対側に周波数が変化した測位点がある。

従って、統計結果では周波数が高くなる場合の方が測位誤差が大きくなったが、必ずしもそうなるとは限らない。

測定時間を6分間にとすると経度方向に大きな誤差が生じたので、経度方向の誤差を減少させるために、最接近時刻付近を挟む2分間にして同様に測位計算を行った。但し、この場合はショートドブラ方式であることが前提である。図4-5にその測位結果を示し、表4-2に統計結果を表す。送信周波数が一定の場合、測定時間を2分間にとすると測位誤差は6分間の場合より増すが、周波数の変化による経度方向の誤差は6分間の場合より減っている。しかし、緯度方向では測定時間が変わっても周波数の変化による誤差の影響が少ないので、6分間の方が良くなっている。

高仰角では周波数が変化すると、経度方向の誤差はnm単位で増大する。しかし、測定時間を6分間あるいは2分間にとすると、高仰角という条件下としては比較的良い結果が得られる。

4. 4 低仰角の時の測位誤差

高仰角の場合と同じように、衛星を見る仰角が75°未満の場合の実測ドブラカウント値に、送信周波数が変化することによって生ずる余分のカウント値を加減した。また、送信周波数が変化する割合はシミュレーションの場合と同じようにした。測定時間が長くなると、送信周波数の変化による経度方向の測位誤差が大きくなるので、低仰角の場合も、受信できたすべてのデータを使うよりも最接近時刻付近を挟む6分間程度のデータを使う方が良いと考え、測定時間は6分間とした。推測位置は、高仰角の場合と同じ考えで、最接近時刻による方法によって求めた結果を用いた。

図4-6にその測位結果を示し、表4-3に統計結果を表す。緯度方向の誤差はほとんど増えていないが、経度方向に誤差が若干増えており、その測位誤差は

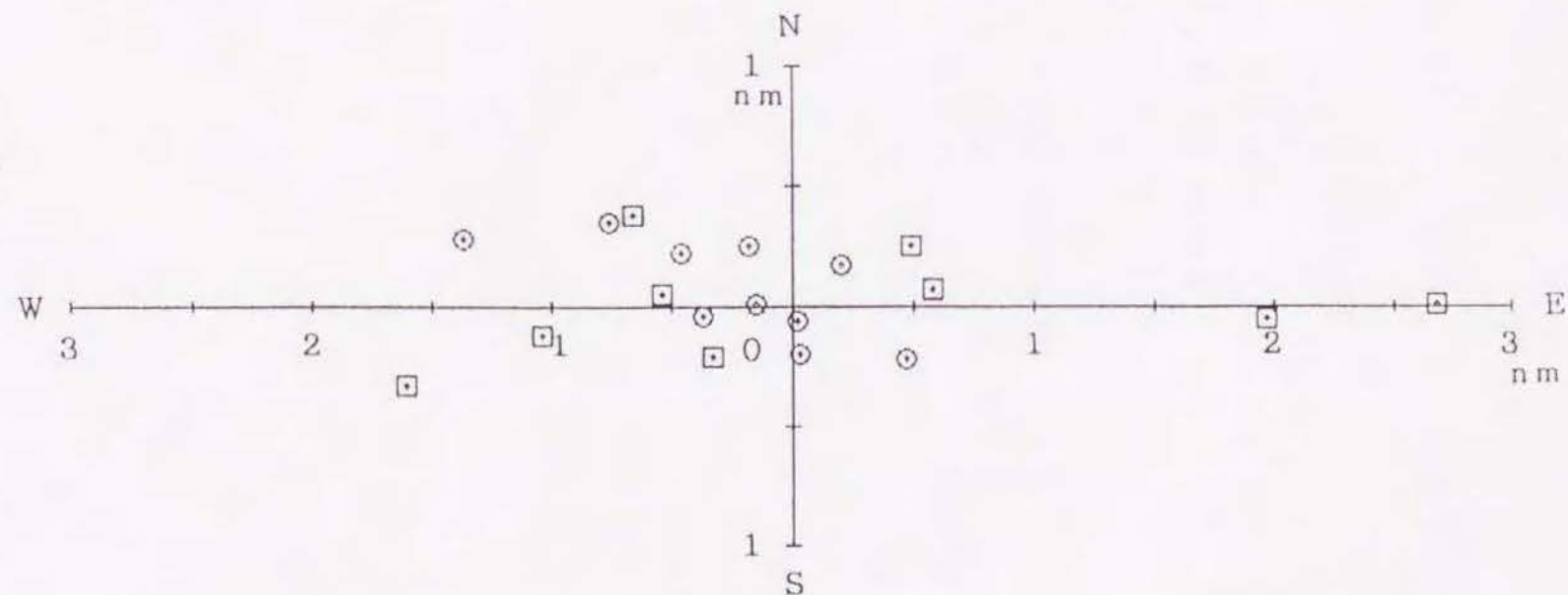


図 4 - 5 送信周波数が変化したときの N N S S のアルゴリズムによる結果 (高仰角、測定時間 2 分間)

□ : 送信周波数が高くなった場合

○ : 送信周波数が低くなった場合

表 4 - 2 N N S S のアルゴリズムによる統計結果
 (高仰角、測定時間 2 分間)

		測位誤差 (90%確率)	
		緯度方向 (nm)	経度方向 (nm)
測定時間 2 分間		0.4	1.1
送信 周波 数	高くなる場合	0.4	2.1
	低くなる場合	0.3	0.9

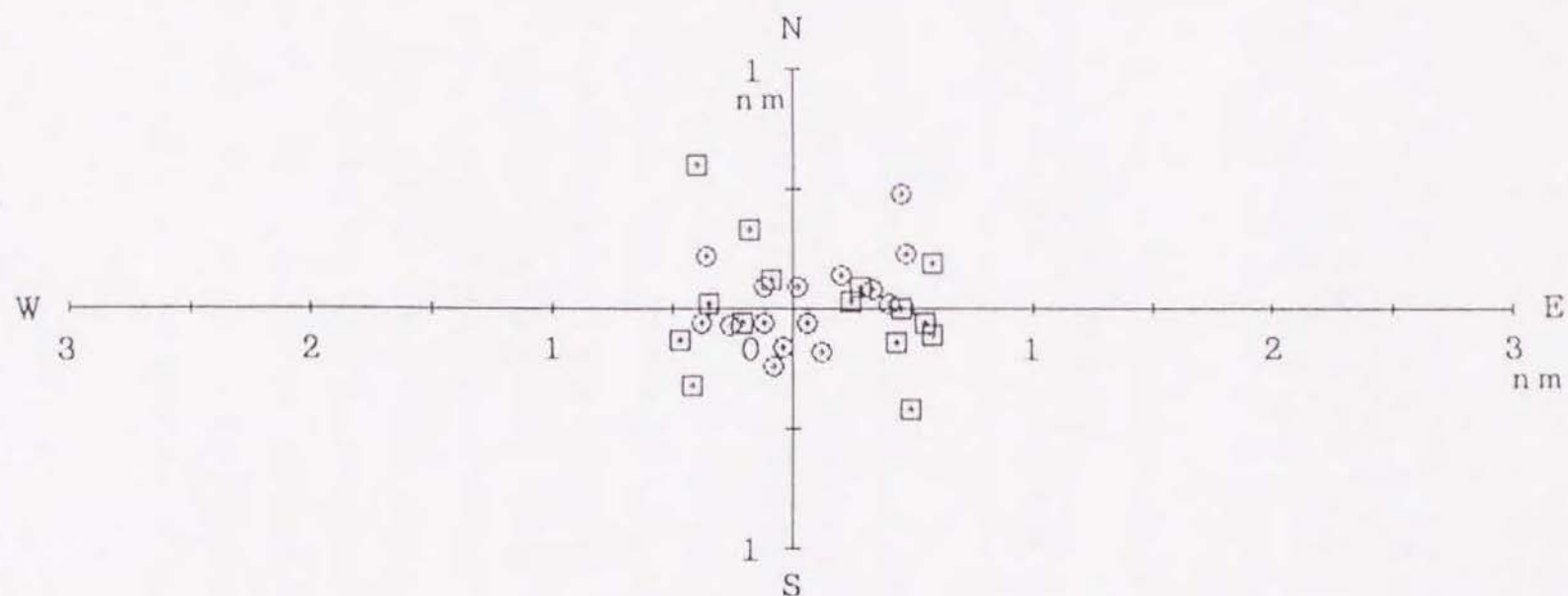


図 4 - 6 送信周波数が変化したときの N N S S のアルゴリズムによる結果 (低仰角、測定時間 6 分間)

□ : 送信周波数が高くなった場合

⊙ : 送信周波数が低くなった場合

表 4-3 送信周波数が変化したときの N N S S の
アルゴリズムによる統計結果
(低仰角、測定時間 6 分間)

送信周波数	測位誤差 (90%確率)	
	緯度方向 (nm)	経度方向 (nm)
高くなる場合	0.4	0.7
低くなる場合	0.3	0.4

周波数が高くなるときで約 0.7nm となっている。この場合も、送信周波数が高くなる方が測位誤差が大きくなっているが、高仰角の場合と同様、必ずしもそうなるとは限らない。

なお、低仰角でも経度方向の誤差を少なくしようとして測定時間を短くすると、測位誤差が大きくなったり、計算が収束しなかったりする場合があるので、高仰角のように測定時間を余り短くする訳にはいかない。

そこで、送信周波数が増える場合の低仰角の測定時間は 6 分間程度が良いと考える。

4. 5 まとめ

N N S S の測位計算では、送信周波数を一定としたアルゴリズムなので、送信中に変わると測位誤差につながる。送信周波数が増える場合、測定時間が長くなるほど測位誤差は大きくなり、特に経度方向の誤差は高仰角になると急激に増す。この誤差を減少させるためには測定時間を少なくして測位計算をすると良い。但し、低仰角では、最接近時刻付近でも電波屈折の影響によるドブラカウンットの誤差が高仰角の場合より多く含まれるために、測定時間を余り短くすると測位誤差が大きくなったり計算が収束しなくなる場合がある。

この章の解析では、送信周波数が増える場合、最接近時刻を挟む測定時間は、高仰角では 2 分間、低仰角では 6 分間程度が良いことが分かった。また、そのときの測位誤差は、高仰角の場合、緯度方向で 0.4nm、経度方向で 2.1nm、また低仰角ではそれぞれ 0.4nm、0.7nm となった。測定時間が 6 分間で周波数が一定の場合の測位誤差と比較すると、高仰角では緯度方向で 0.3nm、経度方向で 1.8nm、また低仰角ではそれぞれ 0.1nm、0.4nm 増加した。

第5章 衛星の軌道情報に関する測位誤差

5.1 はじめに

衛星の位置は、測位点を求める基準点として使われるので、衛星の位置の決定に誤差があると、それに応じた測位誤差^{42)~44)}が生じる。そのため、できるだけ正しい衛星の位置を求める必要があるが、その位置を計算するための軌道情報の精度はシステム運用者側の責任に属する。軌道情報は、軌道要素の値と衛星の軌道楕円上での進み遅れ、浮き沈み、左右方向の外れの値とに分けられる。軌道要素の値は、半日位の短い間にはそう変化はなくまず問題はない⁶⁴⁾とされており、各要素の最下位の数値が変化しても、測位誤差は秒以下となる。それに対して、軌道楕円から衛星が外れる値は、主として地球の重力場の不均一さによるもので、重力場のモデルの精度によってその精度も左右される。近年は重力場のモデルも改良され、衛星の位置は数10m以内の精度⁶⁴⁾におさえられていると言われている。

NNSSによる測位計算では、2周波を使用した精密測位の場合、この進み遅れ、浮き沈み、左右方向の外れの三つの値をすべて使って衛星の位置を求めているが、1波処理の測位の場合には他の要因による測位誤差の方が大きいので左右方向の外れの値は使わないことがある。

そこで本章では、1波処理において左右方向の外れの値を使わないことによる測位誤差を解析し、少しでも測位精度の向上をはかるならば、衛星の左右方向の値も測位計算に使用した方が良いということが分かった。

5.2 衛星の左右方向の外れによる測位誤差

5.2.1 衛星位置の計算

衛星の位置は、図5-1に示す衛星軌道の6要素と、衛星が軌道楕円から外れる値（進み遅れ、浮き沈み、左右方向の外れの値）から計算される。このとき、

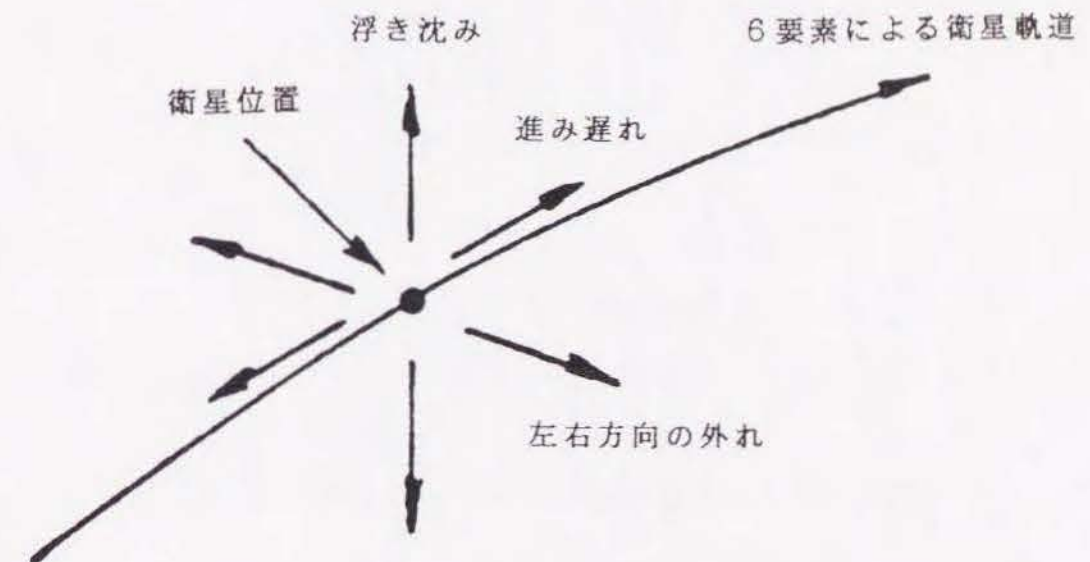


図5-1 地球重力場の不均一による軌道からの衛星の外れ

軌道からの左右方向の外れ (η_k) の値を用いるか否かで次の二つの式⁶⁵⁾のどちらかを使用する。

$$S_k = \begin{vmatrix} x_k \cos \beta_k - y_k \cos i \sin \beta_k + z_k \sin i \sin \beta_k \\ x_k \sin \beta_k + y_k \cos i \cos \beta_k - z_k \sin i \cos \beta_k \\ y_k \sin i + z_k \cos i \end{vmatrix} \quad (5-1)$$

$$S_k = \begin{vmatrix} x_k \cos \beta_k - y_k \cos i \sin \beta_k \\ x_k \sin \beta_k + y_k \cos i \cos \beta_k \\ y_k \sin i \end{vmatrix} \quad (5-2)$$

但し、

S_k : 衛星位置

x_k, y_k, z_k : 地球固定の座標系に直す際の変換値

i : 軌道傾斜角

β_k : 地球固定の座標系に直す際の回転角

ここで、 z_k は η_k に等しく、精密測位の場合は5-1式を使い、左右方向の外れの値を使わないときは5-2式を使う。

5. 2. 2 実測した左右方向の外れの値

衛星の軌道からの左右方向の外れが受信の都度、どのような値をとっているかを図5-2⁶⁶⁾に示す。測位点は $34^\circ 15.12' N$ 、 $133^\circ 12.42' E$ である。縦軸は受信開始からの経過時間を示しており、4分ごとに得られる η_k の動きを示している。

η_k の値は、衛星が測位点より見て北方移動か南方移動か、あるいは東側か西側かで顕著な傾向を示している。このことは、地球の重力場の不均一さの影響によるものであり、測位点から見える範囲の衛星の軌道からの左右方向の外れの動

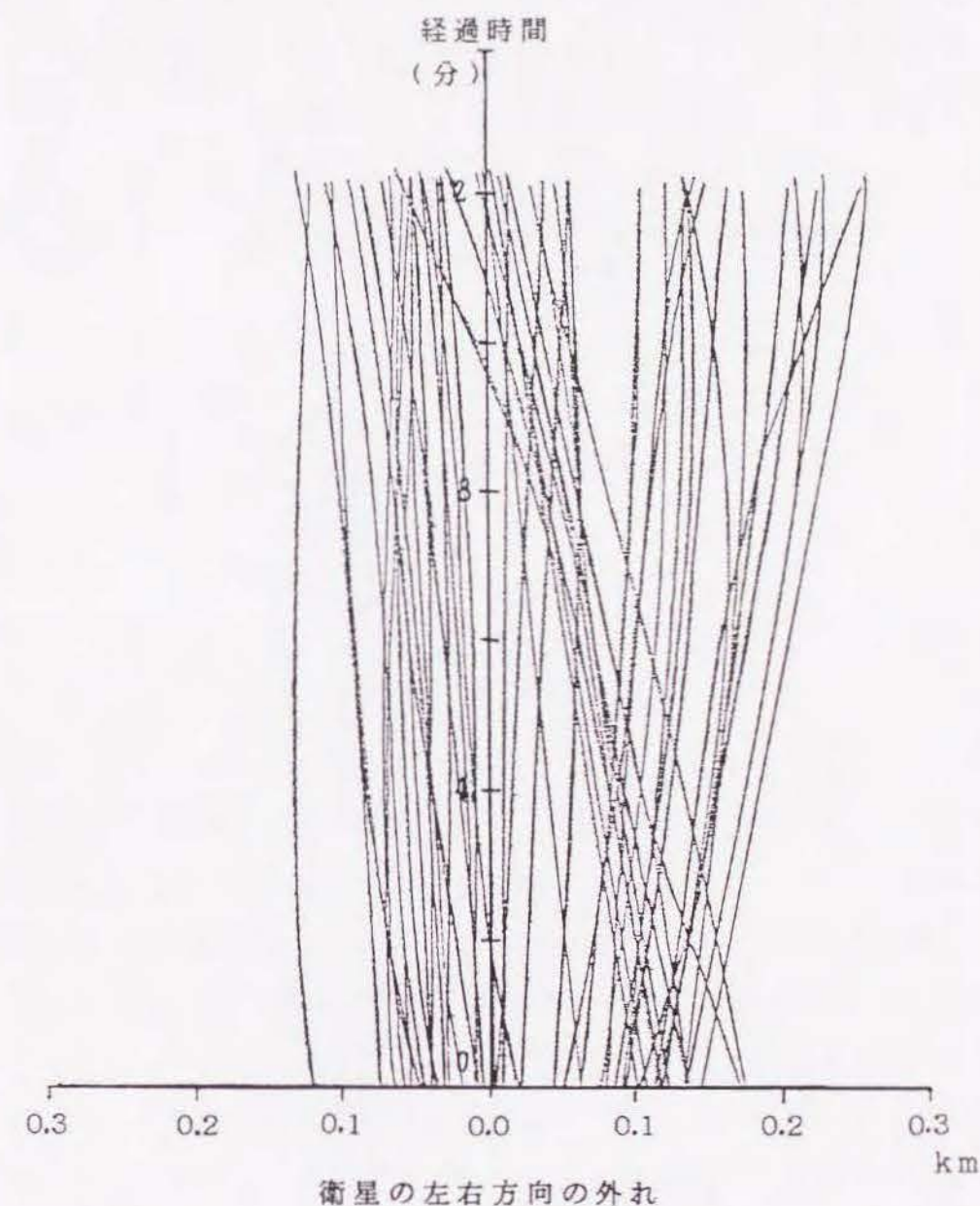


図5-2 衛星の左右方向の外れの実測値

きが分かる。

今、図5-2の結果より、傾きの最大のものを選び、受信開始からの η_k の値を5-3式で表すこととし、NNSのアルゴリズムで η_k を用いないことによる測位誤差をシミュレーションで計算するために使用した。

$$\eta_k = \pm (k-1) / 50 + Q \quad \text{km} \quad (5-3)$$

ここで、

$k : 0, 1, 2, \dots, 7$ の16分間

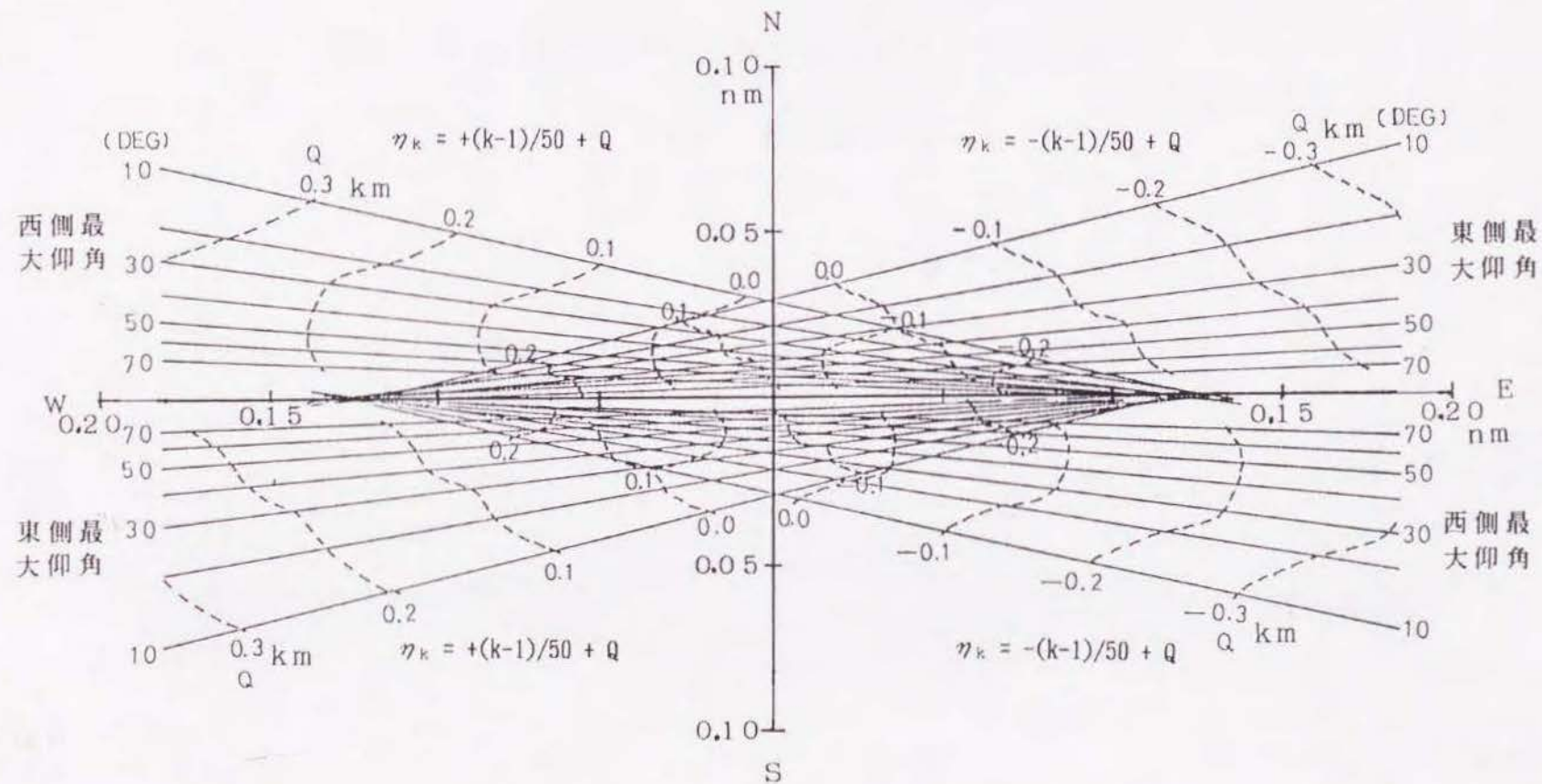
$Q : -0.3 \sim +0.3$ kmまで変化

5. 2. 3 シミュレーションによる結果

シミュレーションの手法によって、 η_k を用いないときのドブラカウント値を4-1式によって求めた。衛星を見る仰角は 10° から 70° まで 10° ごとにした。

測位誤差は、5-1式を使って測位計算をした結果と5-2式を使って測位計算をした結果との差とした。この計算では、 η_k が衛星位置の誤差を意味することになり、 η_k の実測値の±の符号とは逆の誤差があることになる。なお、 η_k は5-3式を使って計算した。

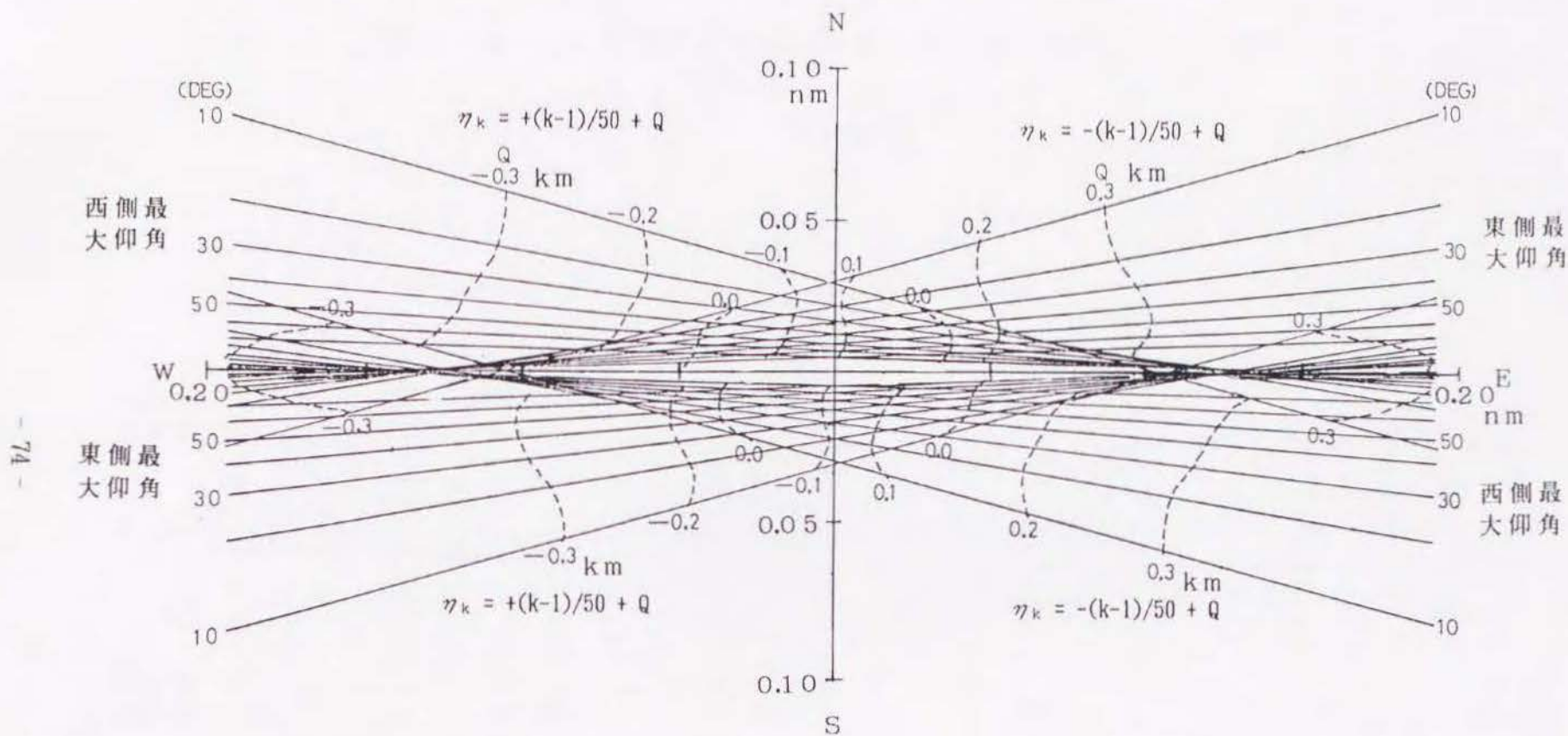
図5-3(a)及び(b)⁵⁵⁾は緯度35度における測位誤差を示したものである。(a)は衛星が北上する場合、また(b)は南下する場合である。受信時間は14分間(低仰角においては12分間)として計算してある。受信時間が異なると測位誤差も変わってくるが、受信が最初と最後あたりだけで途中が受信できていないような状態を除けば、主として経度方向に僅かな差が生じるが、図5-3と同じような傾向を示している。緯度方向の誤差は仰角が低いほど大きく、5-3式のQの絶対値が大きくなると誤差も大きくなる。また、経度方向の誤差はQの絶対値が大きくなれば大きくなり、Qが同じであれば総じて仰角が高いほど大きくなっている。



(a) 北上軌道

図5-3 衛星の左右方向の外れによる測位誤差

(シミュレーション、測定時間14分間)



(b) 南下軌道

図 5 - 3 衛星の左右方向の外れによる測位誤差

(シミュレーション、測定時間 14 分間)

5. 2. 4 実測による測位誤差

実測の η_k による測位誤差は、5-1式を使って測位計算をした結果と5-2式を使って測位計算をした結果との差とした。図5-4はその測位誤差をプロットしたものである。○は高仰角の測位誤差、また+は低仰角の測位誤差を示している。仰角が 10° のときのシミュレーションの結果を図中に実線で示すと、全ての実測誤差がシミュレーションの誤差範囲内に入る。また、表5-1は実測による測位誤差の統計結果である。いずれも測位誤差は小さいが、その中で大きいのは、高仰角の経度方向で0.06nmになっている。

次に、 η_k による測位誤差を仰角別に示したものが図5-5(a)及び(b)である。(a)は衛星が北上する場合で、(b)は南下する場合である。○は緯度方向の誤差、また●は経度方向の誤差を示している。仰角がほぼ 75° を越すと緯度方向の誤差は小さいけれども、経度方向の誤差は大きくなる。また、仰角が 60° 位で緯度、経度方向とも誤差は小さくなるが、それより仰角が低くなると緯度、経度方向とも誤差が増えてくる。これらの傾向を、仰角が 75° までであるが、もっと顕著にみるためにデータを増やして示したものが、図5-6(a)及び(b)⁶⁶⁾である。

η_k は地球の重力場の状態や緯度によっても変わってくるので、5-3式において傾きが大きくなると、ほぼ緯度方向に平行に測位誤差が大きくなる。また、低緯度では緯度方向の誤差は小さくなり(緯度0度ではほとんどない)、高緯度になるにつれて大きくなる。経度方向の誤差は、低緯度から高緯度になるにつれて若干大きくなる。いま、緯度0度のときの η_k による測位誤差を見るために、 η_k を -0.5km から $+0.5\text{km}$ まで 0.1km ごとに変化させて測位誤差を計算した。その結果を図5-7(a)及び(b)⁶⁶⁾に示す。緯度方向の誤差はほとんどないので経度方向の誤差のみを示した。

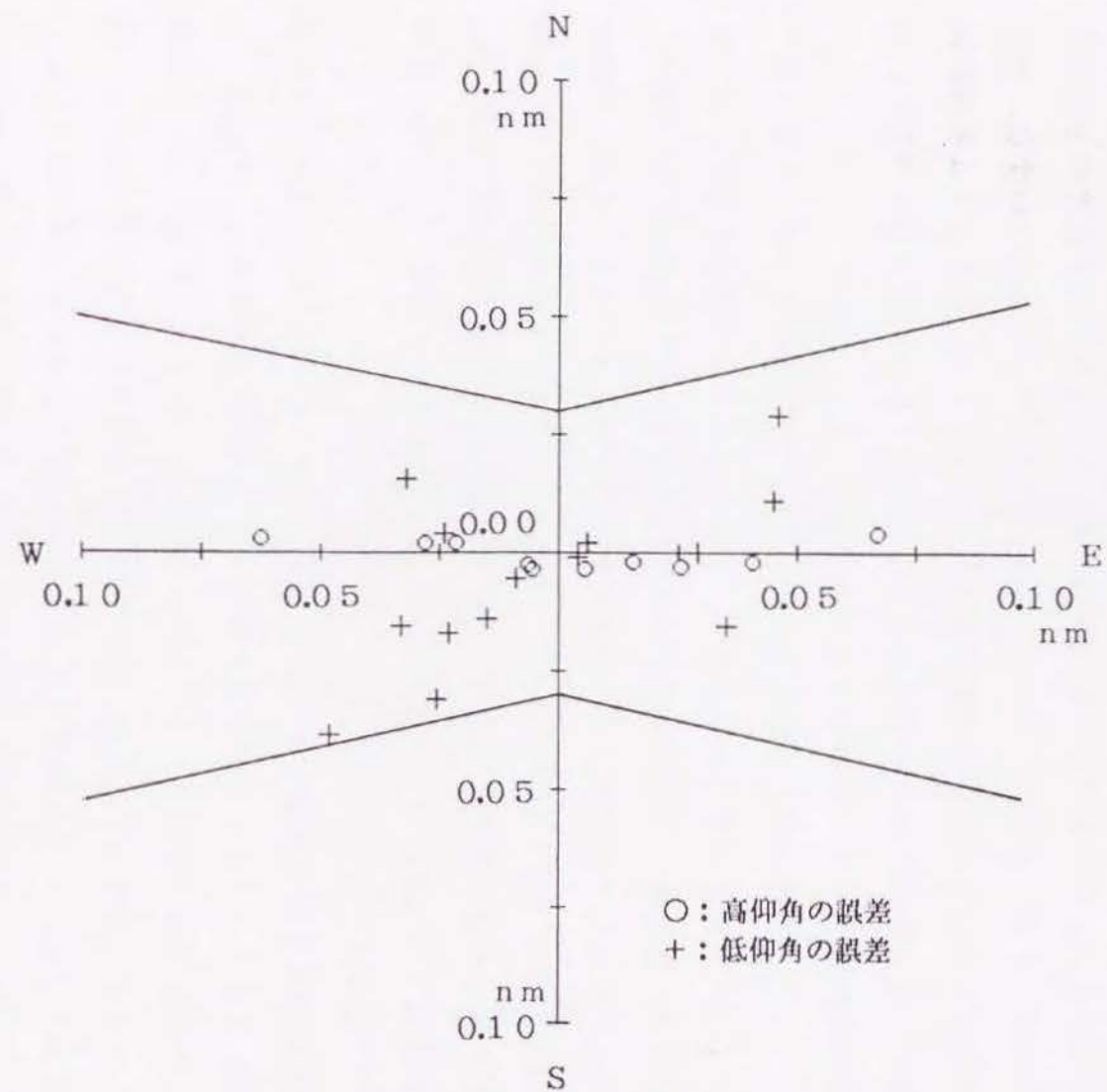


図 5 - 4 衛星の左右方向の外れによる測位誤差
(実測、測定時間 6 分間)

表 5 - 1 衛星の左右方向の外れによる測位誤差

仰 角	測 位 誤 差 (9 0 % 確 率)	
	緯 度 方 向 (n m)	経 度 方 向 (n m)
高 仰 角	0 . 0 1	0 . 0 6
低 仰 角	0 . 0 3	0 . 0 5

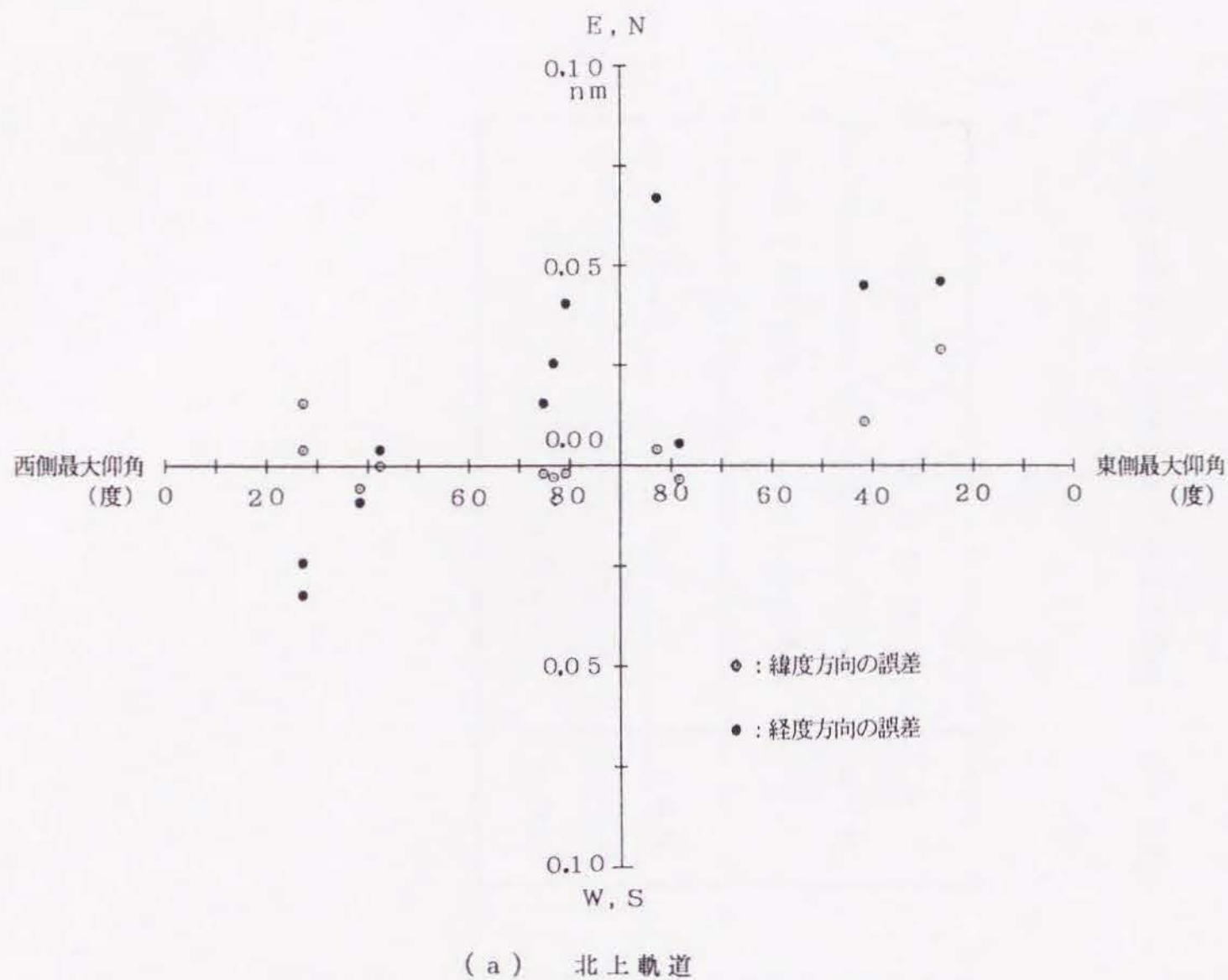


図 5 - 5 衛星の左右方向の外れによる仰角別測位誤差

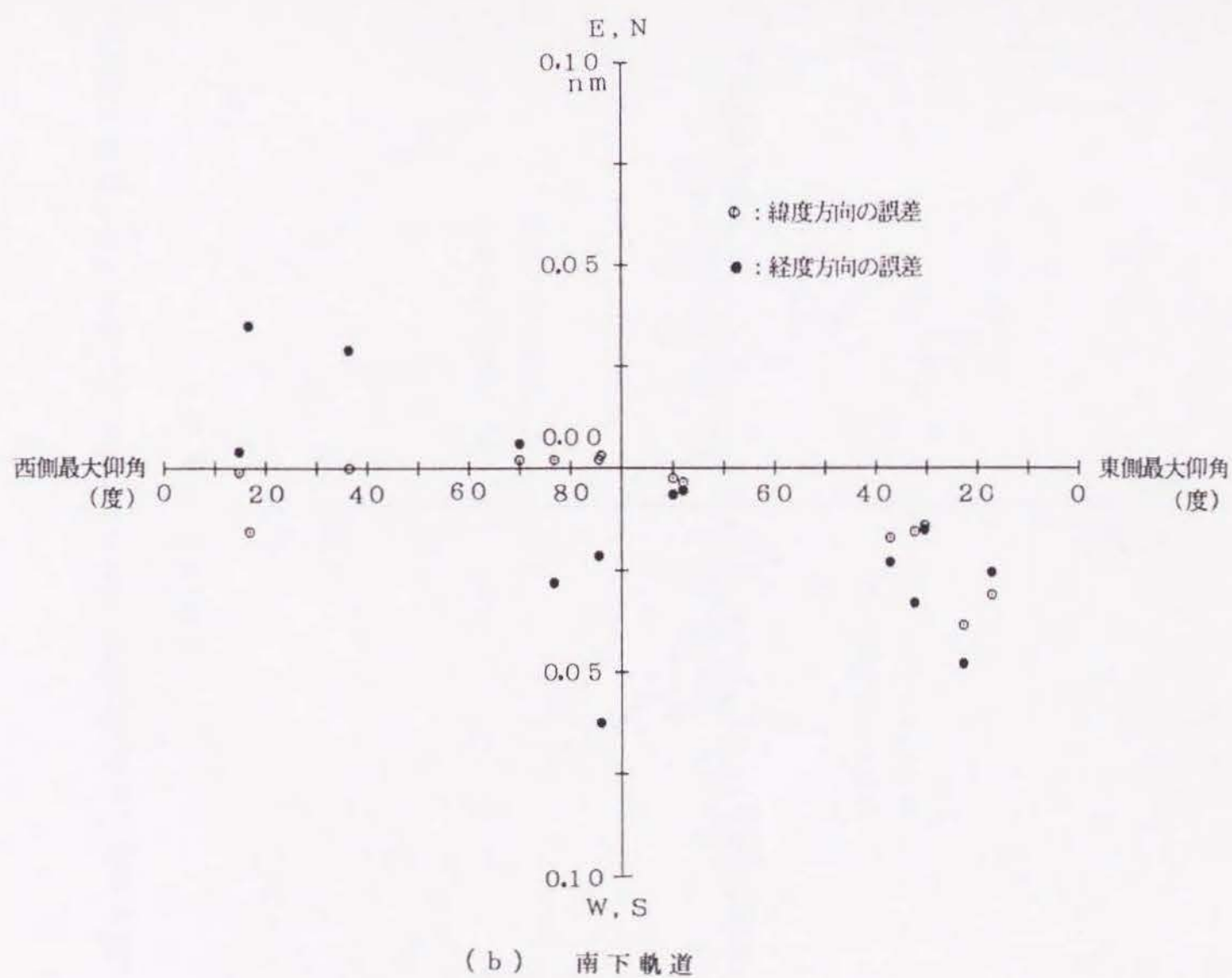
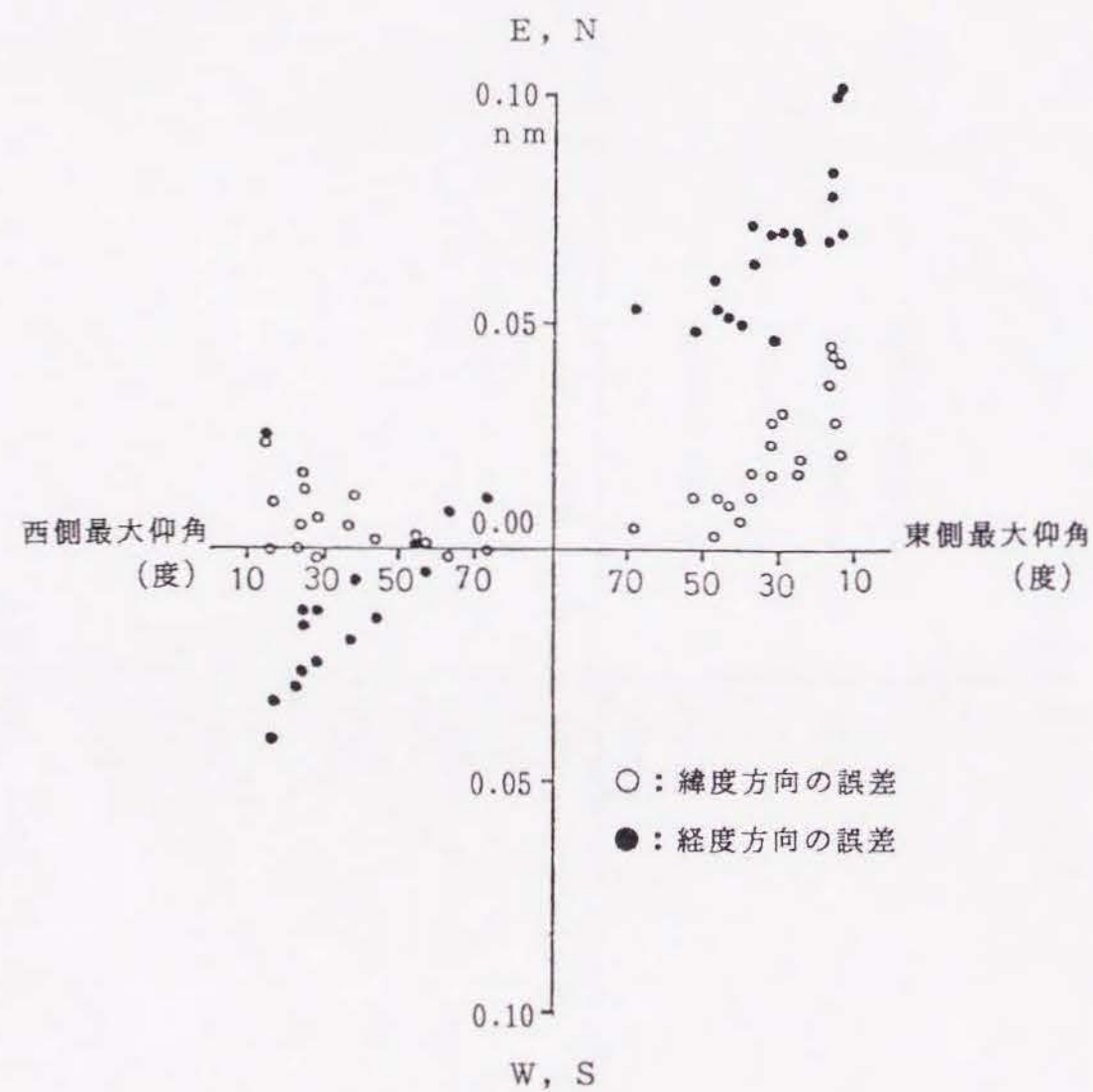
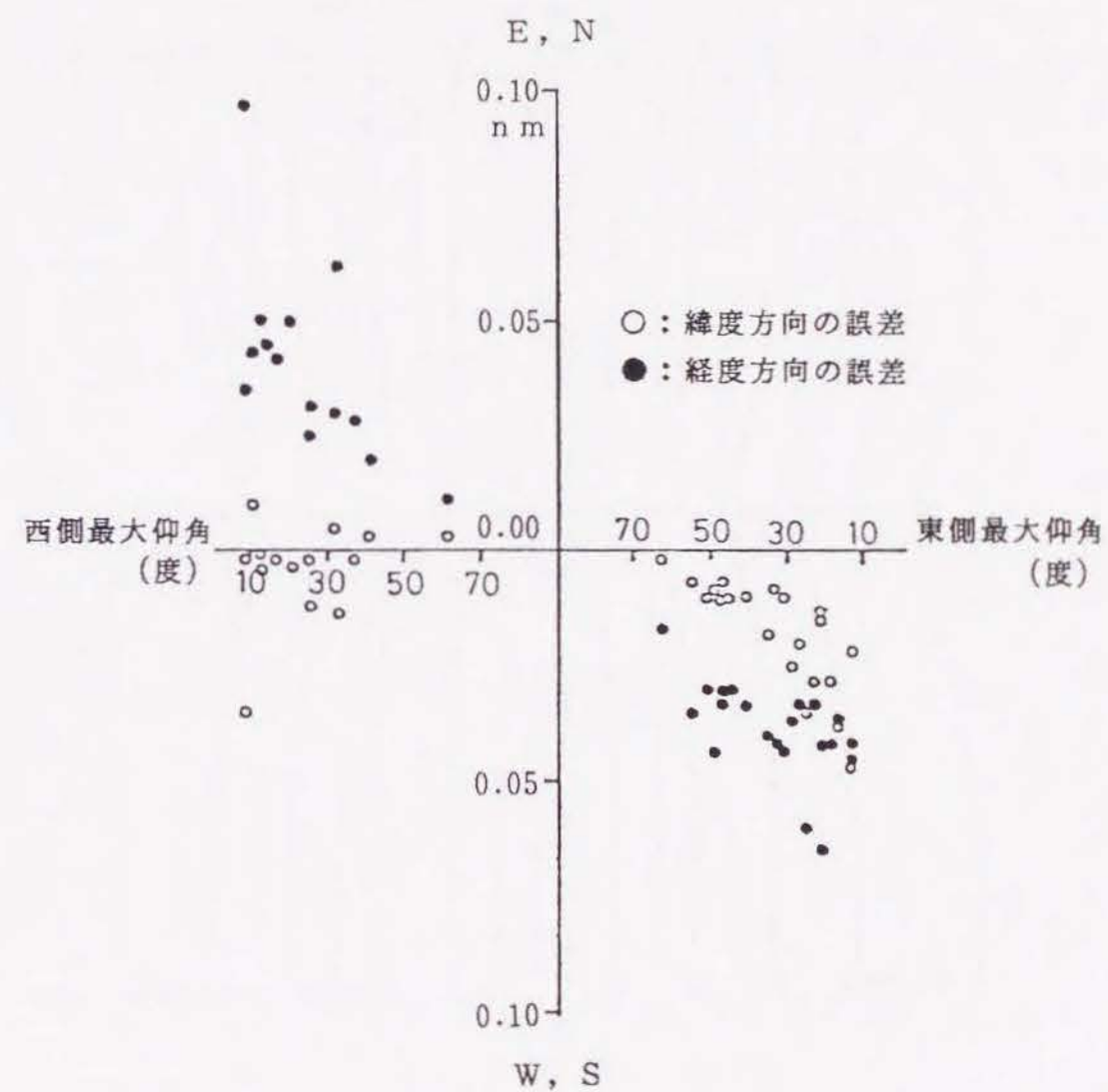


図 5 - 5 衛星の左右方向の外れによる仰角別測位誤差



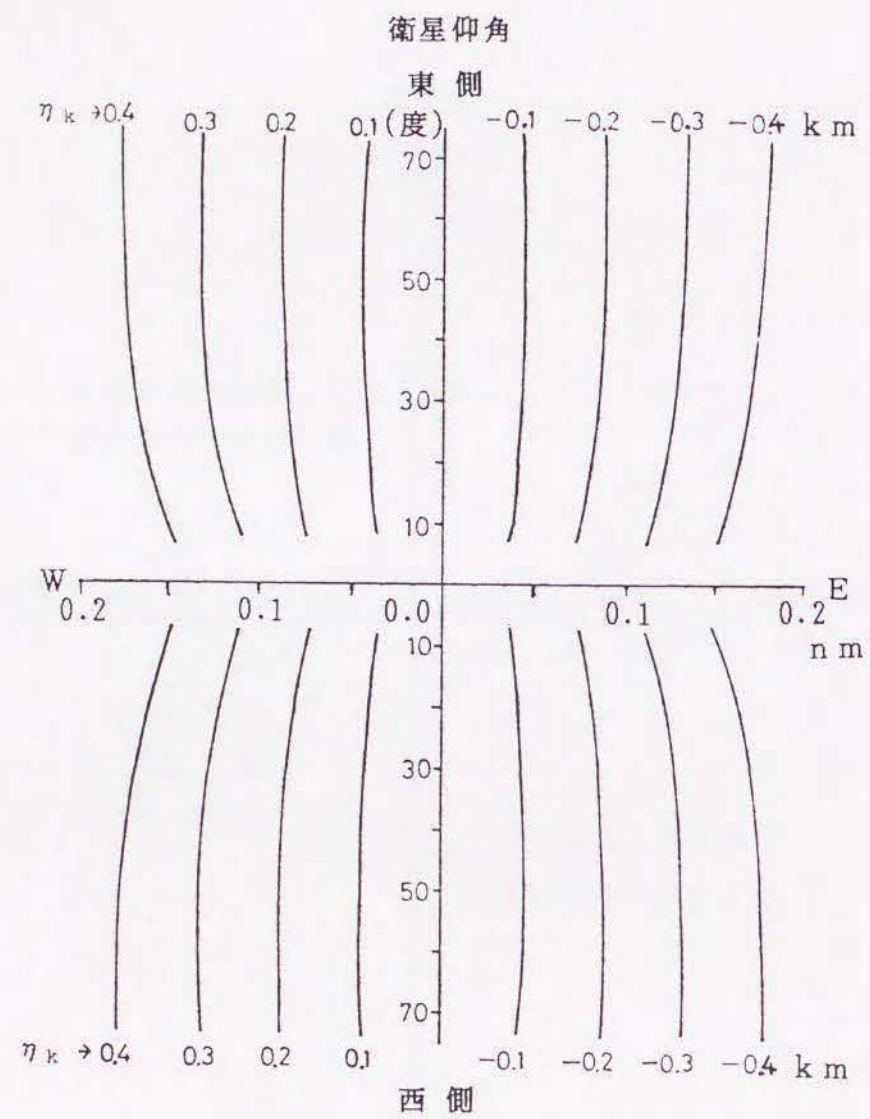
(a) 北上軌道

図5-6 η_k を計算に入れないことによる仰角別測位誤差 (低仰角)



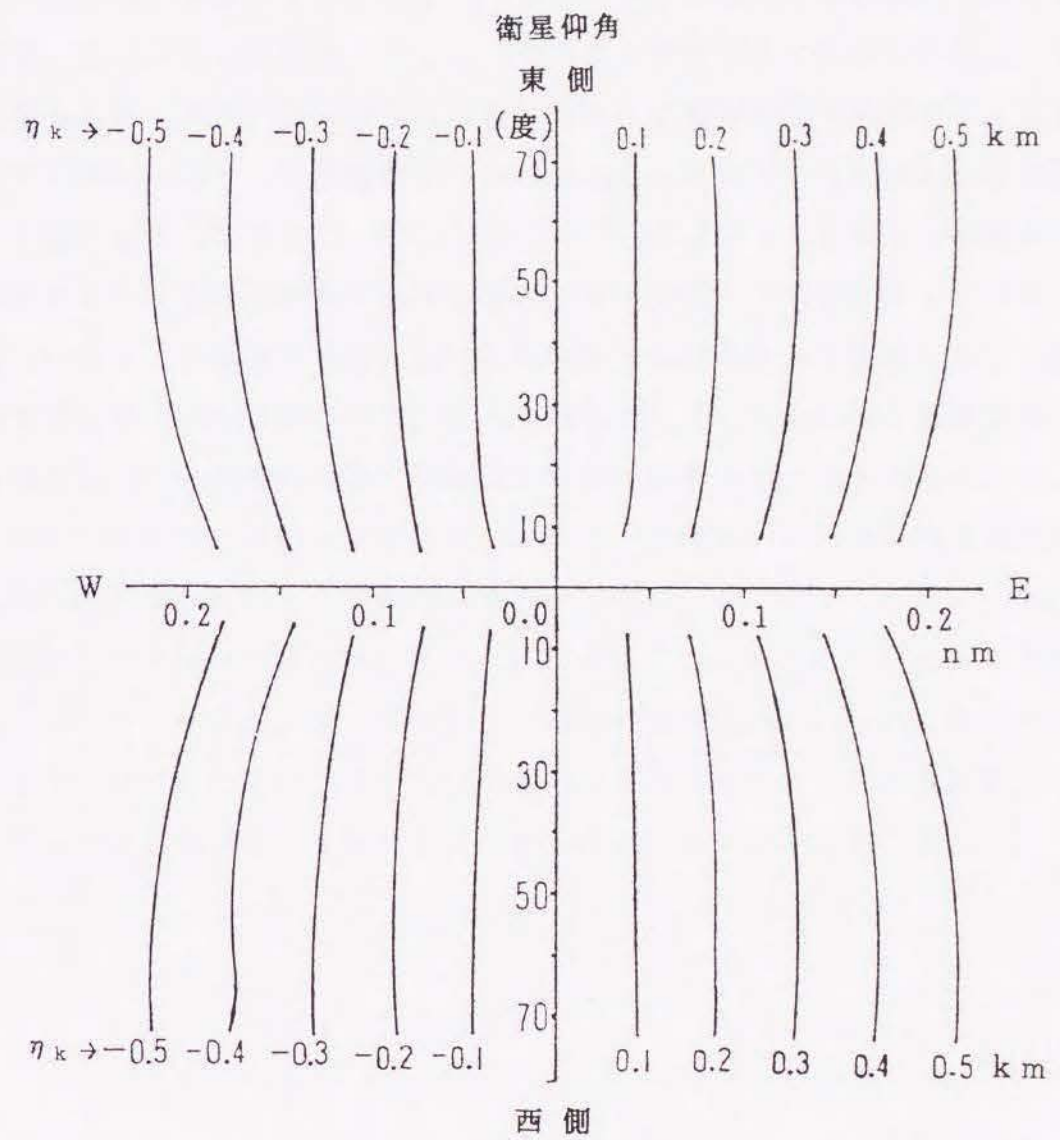
(b) 南下軌道

図5-6 η_k を計算に入れないことによる仰角別測位誤差 (低仰角)



(a) 北上軌道

図5-7 緯度0度における η_k による測位誤差



(b) 南下軌道

図5-7 緯度0度における η_k による測位誤差

5. 3 まとめ

衛星の軌道情報は測位誤差に大きく影響が生じない程度に更新されており、測位計算に必要な情報はすべて使用した方が、少しでも測位精度の向上につながる。以前は電子計算機のメモリ容量なども小さく高価であったために、測位誤差に大きく影響しなければ5-2式のように簡易化して計算を行っていた。そうすれば、データの整理に必要なメモリも要らないからである。しかし現在では、電子計算機も安価になっているので、測位計算に必要なすべての情報を使用すべきである。

衛星の左右方向の外れを計算に入れないことによる測位誤差は、大きくても高仰角の経度方向で0.06nm位と小さいけれども、少しでも測位精度の向上を目指すならば左右方向の外れの値を使用すべきであるし、現在では使用についての大きな問題は見あたらない。

第6章 アンテナ及びジオイド高さによる測位誤差

6. 1 はじめに

NNSSのアルゴリズムでは、外部入力として推測位置の他にアンテナ高さ、ジオイド高さ、針路、及び速力がある。アンテナ及びジオイド高さによる測位誤差は早くから取りあげられ、解析^{38), 67)}がされてきた。NNSSの測位計算には、必ず電子計算機が必要とされるため、当時ではその価格は高く、メモリも限られていた。そのため、できるだけ入力の簡易化をはかって価格を下げようとした研究^{52), 53)}もある。この章では、アンテナ及びジオイド高さを取りあげ、それらの誤差が測位誤差に及ぼす影響について解析する。

アンテナ高さは、測位の対象状況、例えば、遭難救助、海洋観測、生物の回遊などの状況が分かれば、そのおおよその高さは分かる。また、ジオイド高さも推測位置が分かれば、大体の高さが分かる。このように、それらの高さが推測されると、アンテナ高さとジオイド高さを合わせても数10mといった大きな高さの誤差はないと考えられるが、僅かな高さの誤差でも測位誤差に与える影響を解析しておくことは、測位置の信頼性という面においても重要なことである。

6. 2 シミュレーションによる解析

6. 2. 1 シミュレーションの方法

今、静止地点で測位をするものとして、そのときの位置をPとし、経度0度方向をX軸とする地球固定のXYZ座標系上でPを表すと次式⁶⁸⁾のようになる。

$$P = \begin{pmatrix} \{(R^2/D) + A + G\} \cos \phi \cos \lambda \\ \{(R^2/D) + A + G\} \cos \phi \sin \lambda \\ \{R^2(1-f)^2/D + A + G\} \sin \phi \end{pmatrix} \quad (6-1)$$

ここで、

$$D = R \{ \cos^2 \phi + (1-f)^2 \sin^2 \phi \}^{1/2}$$

ϕ : 測位点の緯度

λ : 測位点の経度

A : アンテナ高さ

G : ジオイド高さ

R : 地球半径

f : 地球の偏平率

また、陸上で測位するときには、海面から測位点の場所までの高さも加える。

6-1式で、アンテナ及びジオイド高さ（以下H高という）を0mとすれば6-2式のようになる。

$$P' = \begin{vmatrix} R^2 \cos \phi \cos \lambda / D \\ R^2 \cos \phi \sin \lambda / D \\ R^2 (1-f)^2 \sin \phi / D \end{vmatrix} \quad (6-2)$$

従って、H高が0mのときを真の高さとすれば、6-1式のA+GにH高の誤差を入れると、H高による測位誤差は $P-P'$ で計算できる。

衛星を見る最大仰角の変化に応じて測位誤差の程度と傾向を求めるために、測位点を最大仰角が 10° から 80° まで 10° ごとになるように求めた。その際、衛星の軌道は変えずに測位点の緯度を一定にし、測位点から見て衛星が東側あるいは西側になるように経度を決めた。さらに、衛星は極軌道を回っているので衛星が北上する場合と南下する場合に分けて解析した。この方法は前項までのシミュレーションと同じ方法である。

このようにして決めた測位点で、4-1式を使ってドブラカントを計算した。

6. 2. 2 シミュレーションの結果

NNSSのアルゴリズムでは、繰り返し計算をしながら位置と周波数差を修正する。従って、他のデータに誤差があっても、そのデータは正しいものとして位置と周波数差を計算する。つまりH高に誤差があってもその高さは全く修正されないで、位置と周波数差を修正することによって辻褃を合わせることになる。それが測位誤差を生じさせる。

図6-1(a)及び(b)⁵⁴⁾にはH高に50mと100mの誤差があった場合の測位誤差を示している。緯度は $35^\circ N$ である。(a)が北上軌道の場合で、(b)が南下軌道の場合である。縦軸は緯度方向及び経度方向の誤差をとり、横軸には衛星を見る最大仰角をとっている。緯度方向の誤差は、衛星を見る仰角が変わってもそれほど大きな誤差は生じないが、経度方向の誤差は、仰角が高くなるほど大きくなり、仰角が 70° 以上になると著しく大きくなる。これらの図では示していないが、H高の誤差が一になると図の横軸を境にして対称的になる。また、緯度が低くなると測位誤差は小さくなる。

これらの結果からみると、低仰角の場合には、数10mのH高の誤差では許容でき得る測位誤差と考えられるが、 70° 以上の高仰角の場合には経度方向に大きな誤差が生じることとなる。

そこで、精度の良い位置を求めようとする場合には、できるだけ正確なH高の値を入れる必要がある。

いま、H高が変わった場合、その変化に応じてドブラカントがどのように変化するかを計算した。このことは、H高の変化による衛星と測位点との距離の変化と考えることができる。図6-2は縦軸にドブラカントの変化量（2分間）をとり、横軸には受信開始からの時間をとって示してある。図中の曲線は、H高が100m変化したときについて、東側北上軌道（仰角 10° 、 40° 、 70° ）の場合のドブラカントの変化量を示している。ここで変化させたH高を誤差として考えると、測位点側ではドブラカントの変化量だけ過不足していることになる。このことより、ドブラカントの変化量が多い高仰角では測位誤差が大きくなることが分かる。

また、衛星と測位計算の結果修正された測位点との距離と、衛星と測位計算す

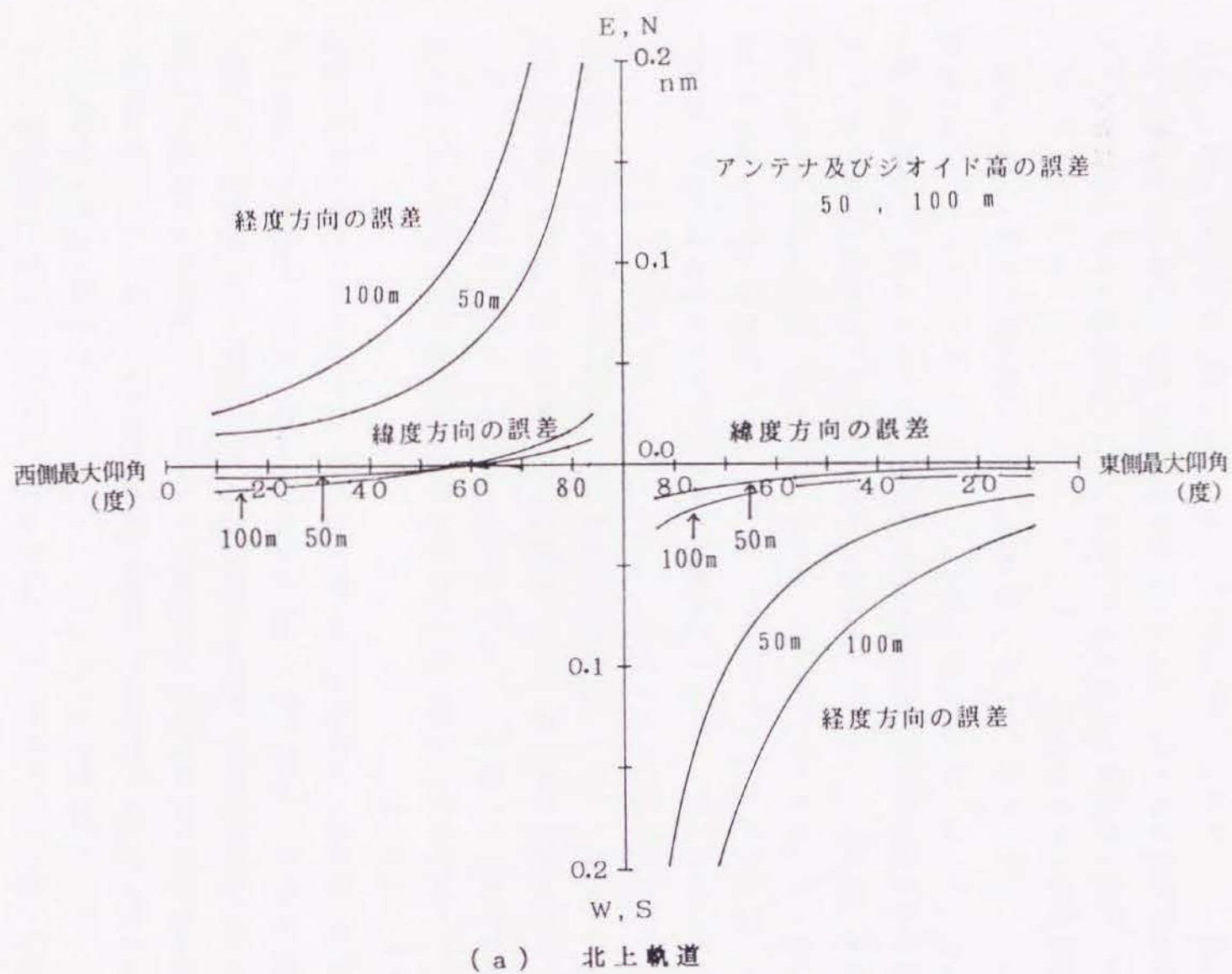


図 6 - 1 アンテナ及びジオイド高さの誤差による測位誤差

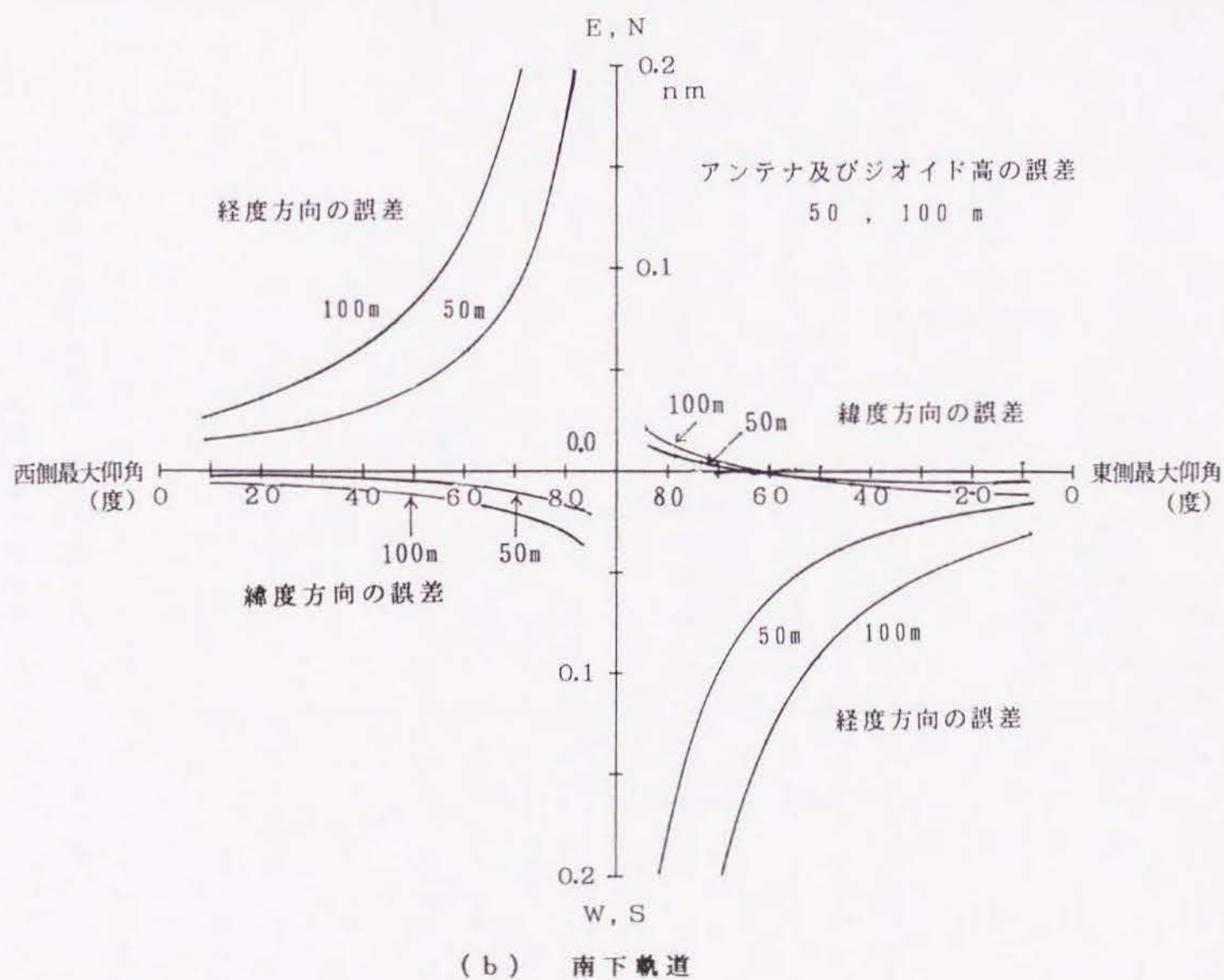


図 6 - 1 アンテナ及びジオイド高さの誤差による測位誤差

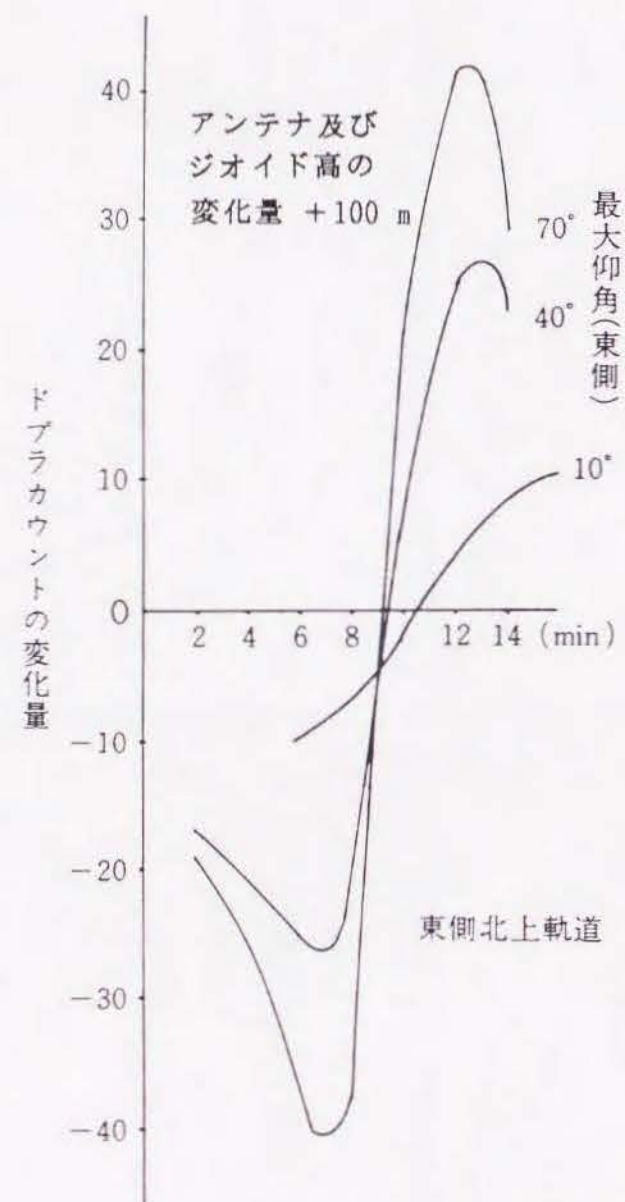


図 6-2 アンテナ及びジオイド高の変化による
ドブラカウントの変化

る前の測位点との距離を比較するために、それぞれの測位点が衛星から受けるドブラカウントを計算した。その差を示したのが図 6-3 である。差はほとんどなくなり、図 6-2 で示したドブラカウントの変化量を、測位点を修正することによって減少させ、衛星と測位点との距離を計算上一定に保とうとすることが分かる。このことは、H 高を修正しないために生じる誤差である。

6. 3 実測による測位結果

いま H 高を 10m 増加したとき、測位誤差がどのようなになるかを実測のデータを用いて示したのが図 6-4 である。測定時間は最接近時刻付近を挟む 6 分間である。表 6-1 に実測による測位誤差の統計結果を表す。誤差が小さいために小数部分は 3 桁まで表した。その中で、誤差が大きいのは、高仰角の経度方向であり、約 0.100nm になっている。シミュレーションでは H 高の誤差を 50m と 100m にしたが、実際の測位の対象物が分かっているならばそれほどの誤差はないと考え、実測では H 高の誤差を 10m にした。図 6-5 (a) 及び (b) は仰角別に測位誤差を示したもので、それぞれ北上軌道及び南下軌道の場合を示している。縦軸及び横軸ともシミュレーションの場合と同じ目盛りにしてある。仰角が 80° あたりまでは緯度及び経度方向の誤差とも小さいが、85° あたりの測位結果では、経度方向の誤差が最大で 0.2nm 近くになる場合がある。

参考のために、仰角が 75° 未満の低仰角の場合であるが、もう少しデータ数の多い結果を図 6-6 (a) 及び (b) ⁵⁴⁾ に示す。シミュレーションの結果とよく一致している。なお、ここでは H 高の誤差は 100m で、ドブラカウントデータは測定できた全てを使っている。また、経度方向の誤差の軸のとり方が、今までの図と上下逆になっており、単位も m である。

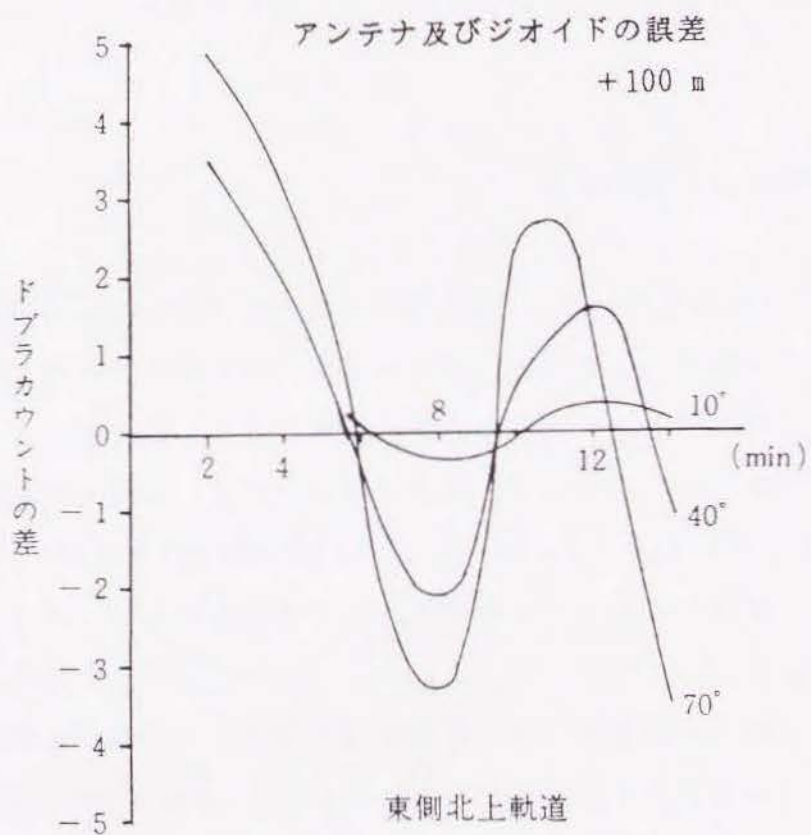


図 6 - 3 アンテナ及びジオイド高に誤差があったときの
測位前と後とのドブラカウントの差

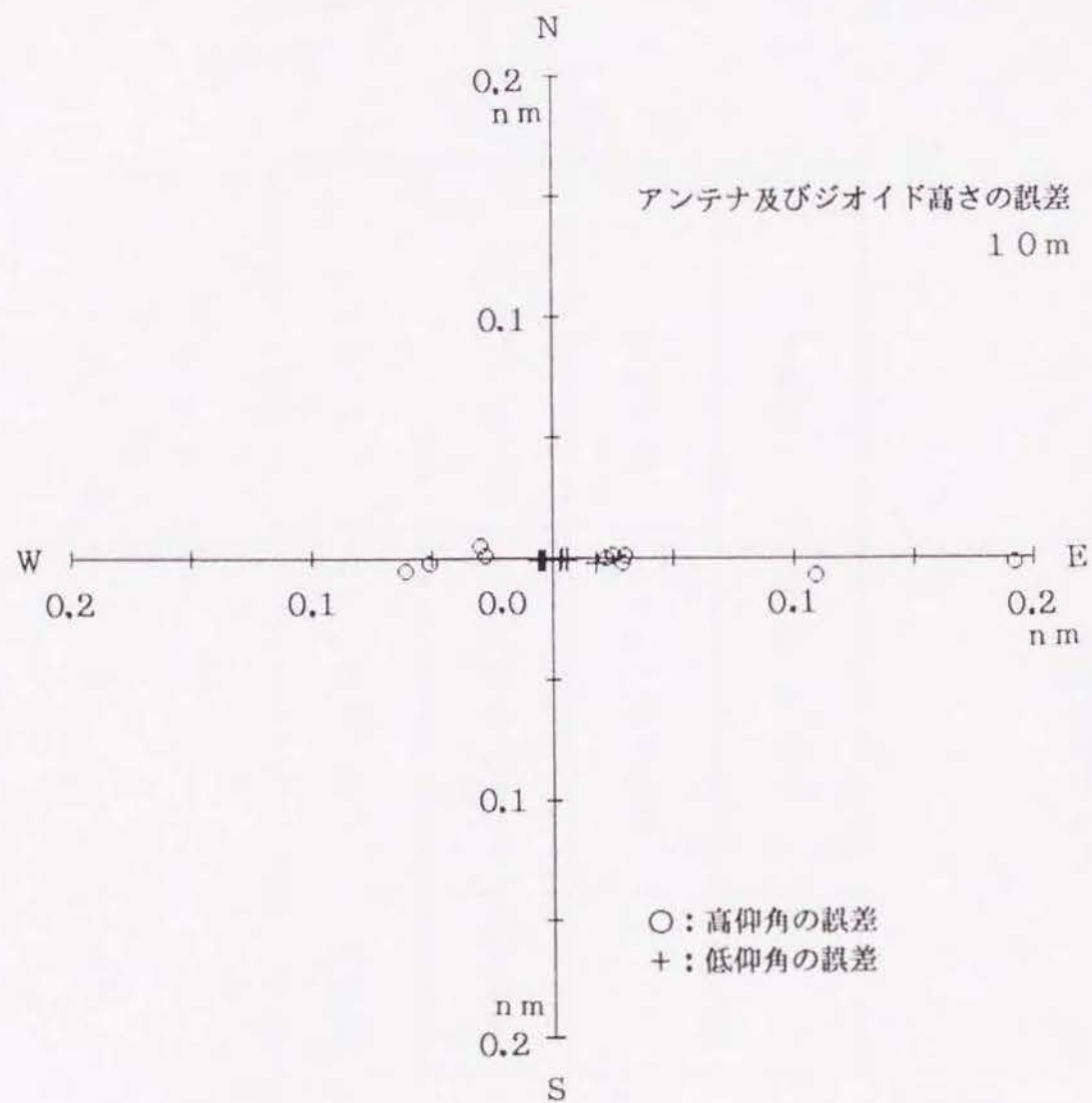


図 6 - 4 アンテナ及びジオイド高さの誤差による測位誤差

表 6 - 1 アンテナ及びジオイド高さの誤差 (10 m)
による測位誤差

仰 角	測 位 誤 差 (90%確率)	
	緯度方向 (nm)	経度方向 (nm)
高仰角	0.005	0.127
低仰角	0.001	0.011

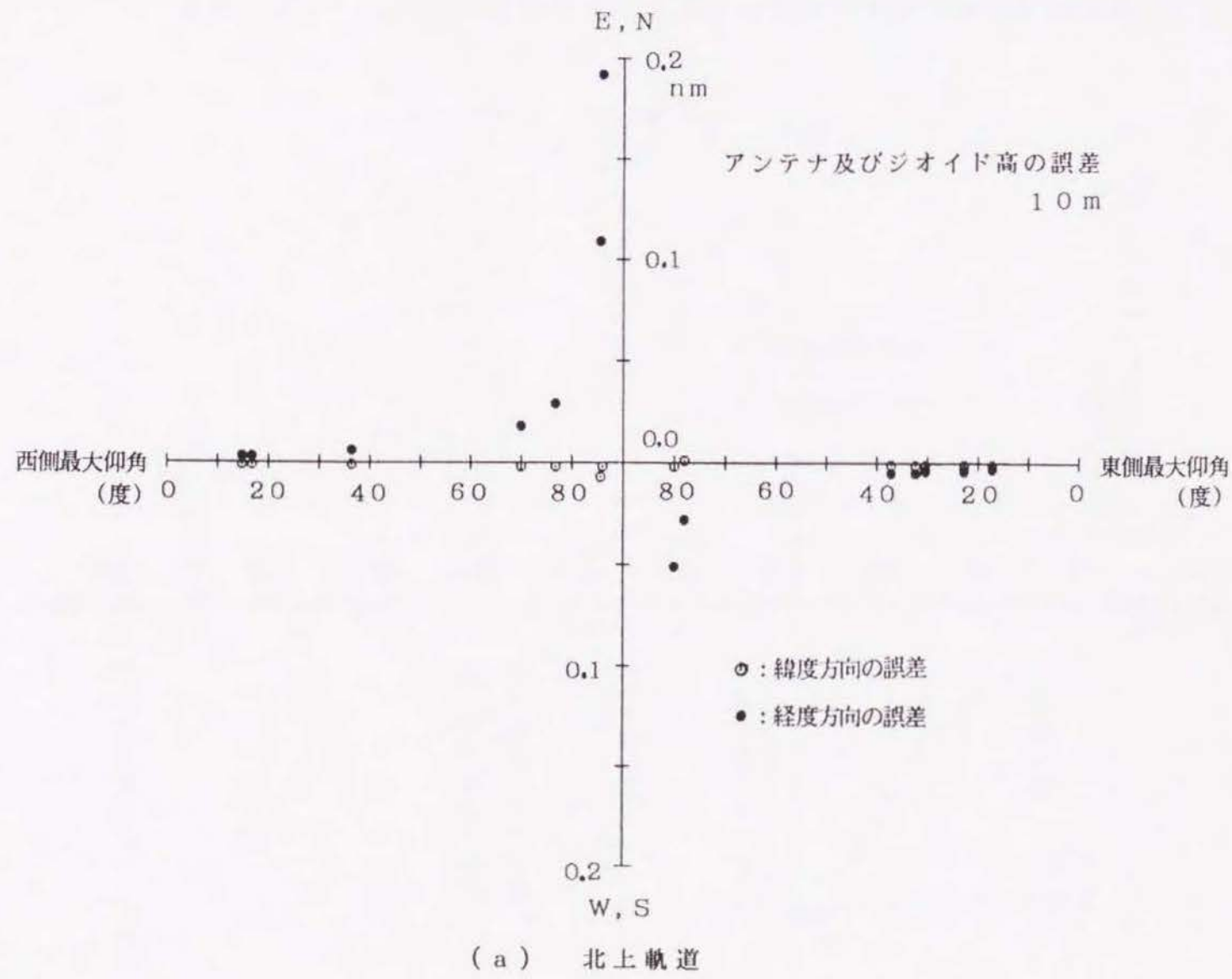
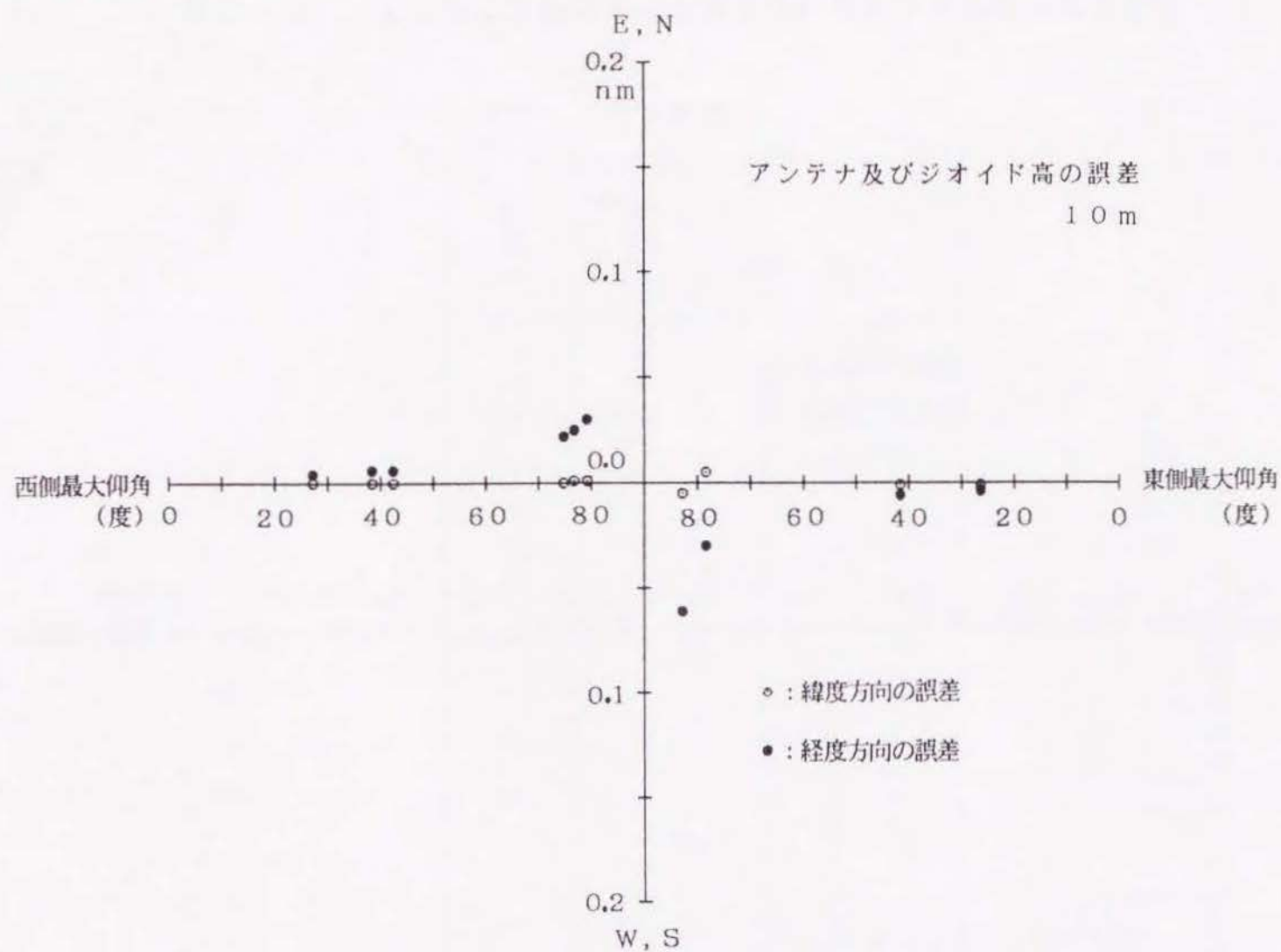
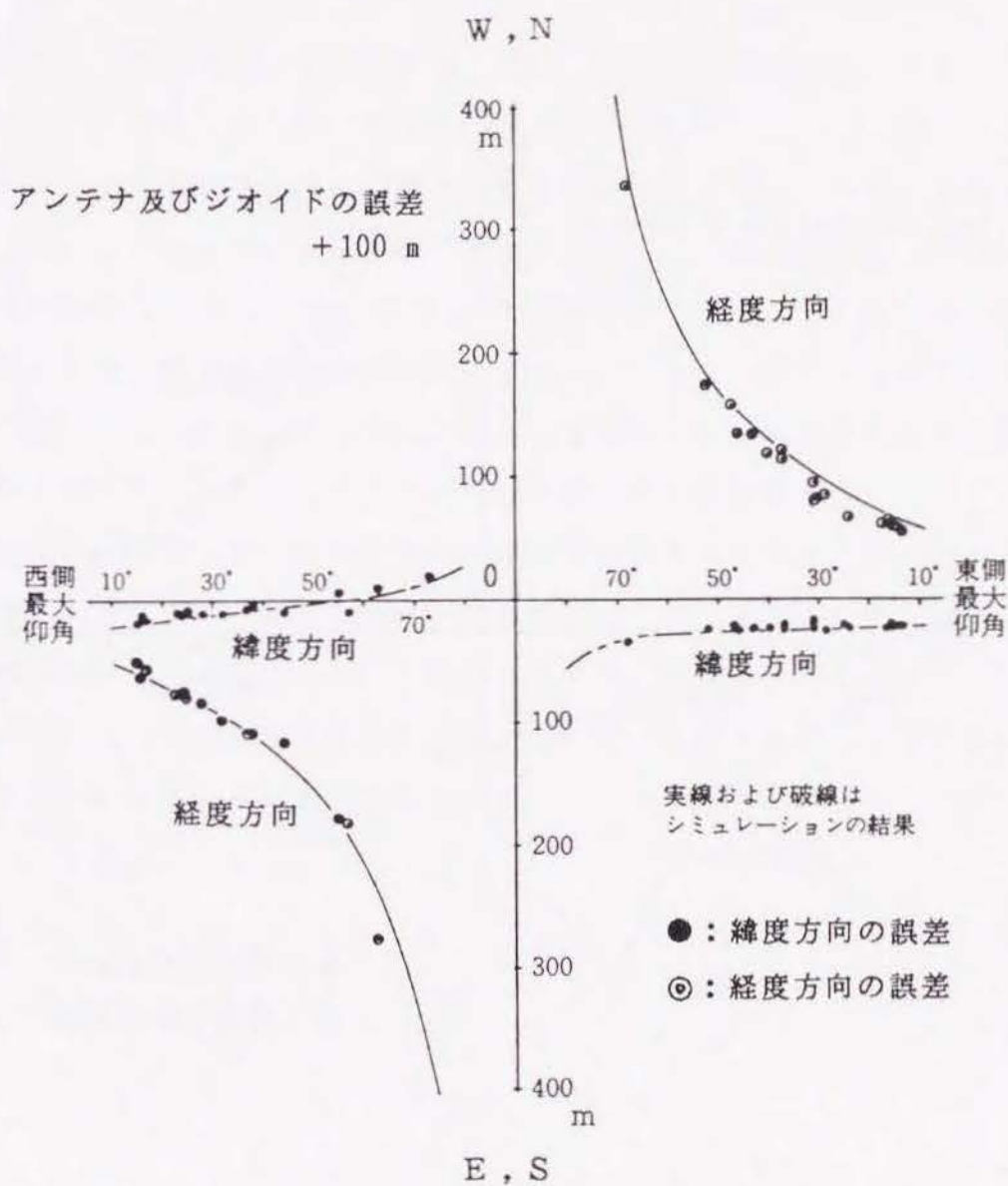


図 6 - 5 アンテナ及びジオイド高さの誤差による仰角別測位誤差



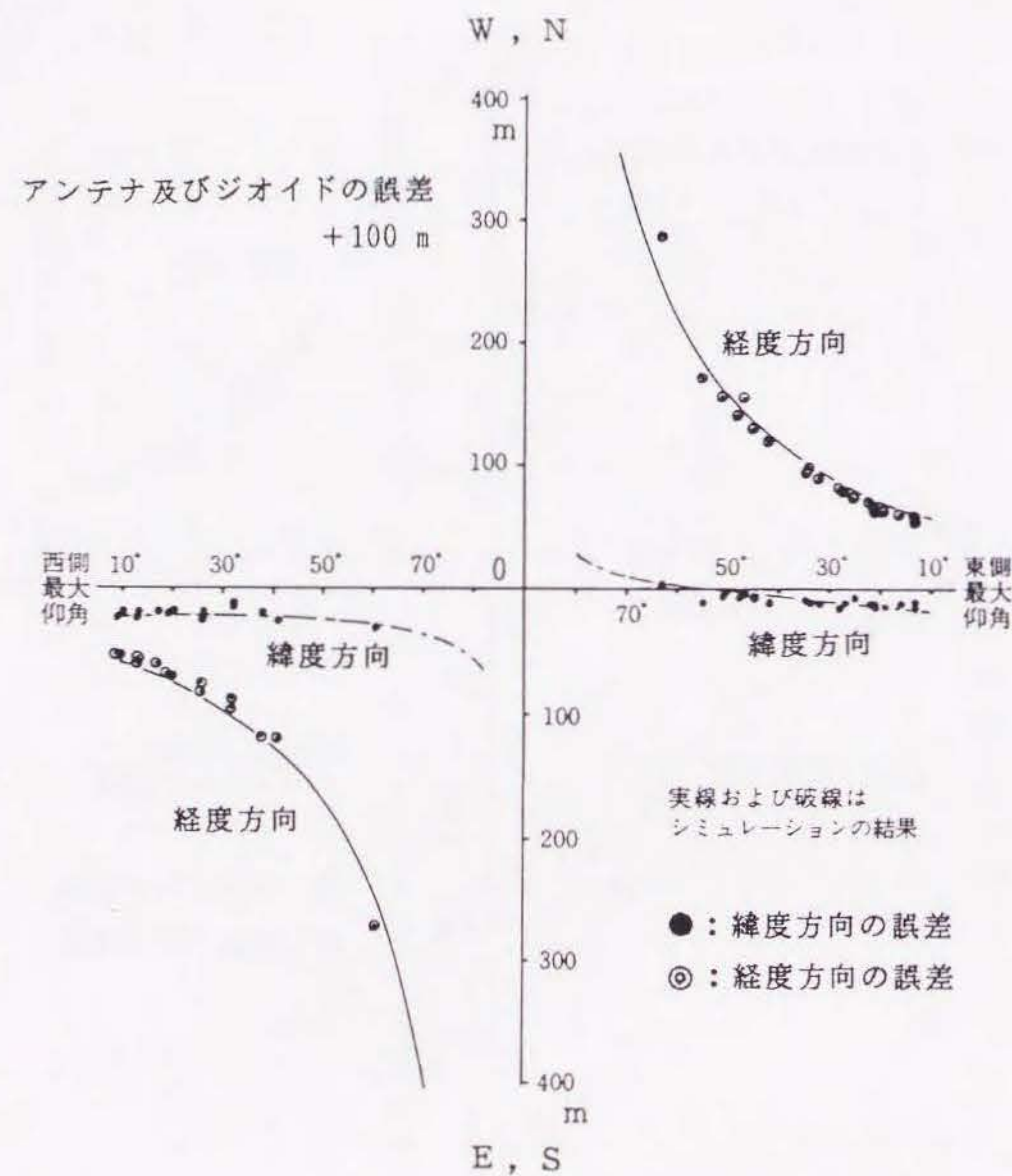
(b) 南下軌道

図 6 - 5 アンテナ及びジオイド高さの誤差による仰角別測位誤差



(a) 北上軌道

図 6-6 アンテナ及びジオイド高による仰角別測位誤差 (低仰角)



(b) 南下軌道

図 6-6 アンテナ及びジオイド高による仰角別測位誤差 (低仰角)

6. 4 まとめ

測位計算をする場合、その対象物が分かっているならば大凡のアンテナ高さは分かる。また、ジオイド高さは、等高線図的に求められた図があるので、その図を参照すれば、測位対象物の推測位置から推定できる。このことから、実測による解析では、アンテナ高とジオイド高の誤差を10mにして測位誤差を計算したところ、高仰角の経度方向で約0.1nmとなり、高仰角の緯度方向、及び低仰角の緯度、経度方向とも測位誤差は無視できる程度であった。また、経度方向の誤差は仰角が85°位で最大0.2nm近くになった。これらの測位誤差は、他の要因による測位誤差と比較すれば小さいけれども、高仰角の経度方向では急に大きくなるので、できるだけ測位対象物側の情報を集め、正確な高さを求めるようにするべきである。

しかし、鳥のように高空を飛び、その高さに大きな誤差を含むときには、3次元の測位計算をするなどの対策が必要となるが、H高が-100m位までの誤差であれば、かえって測位誤差は小さくなる。それは、電波屈折による電波経路長の増加と相殺されるところがあるためである。

〔用語解説〕

ジオイド⁶⁹⁾

水平面というものは、各地で単独に作りだされる。つまり、各地の水平面の高さは等しくない。しかし、つなぎ合わさった水平面というものを考えるとき、海面の高さで地球をならし、海でおおわれたときの地球の表面をジオイドと説明することができる。厳密には海でおおうと重力が変わってくるのでジオイドの形も変わってくる。

地球をならした形のジオイドは回転楕円体になると考えられていたが、人工衛星の運動の解析によって、南北の非対称さを強調して描けば、図6-7のように西洋ナシの形をしていることが分かった。これは地球の重力が各地で異なっているためにおこったものであり、各地の重力の強弱により、海面にも凸凹ができていることになる。

そこで、人工衛星の軌道追跡を行うようになり、その解析からより詳しいジオイドの形が求められるようになった。ジオイドは、回転楕円体からどれだけ外れているかを等高線で描くことができ、その高さをジオイドの高さと言っている。図6-8⁷⁰⁾はそのジオイドの等高線図である。

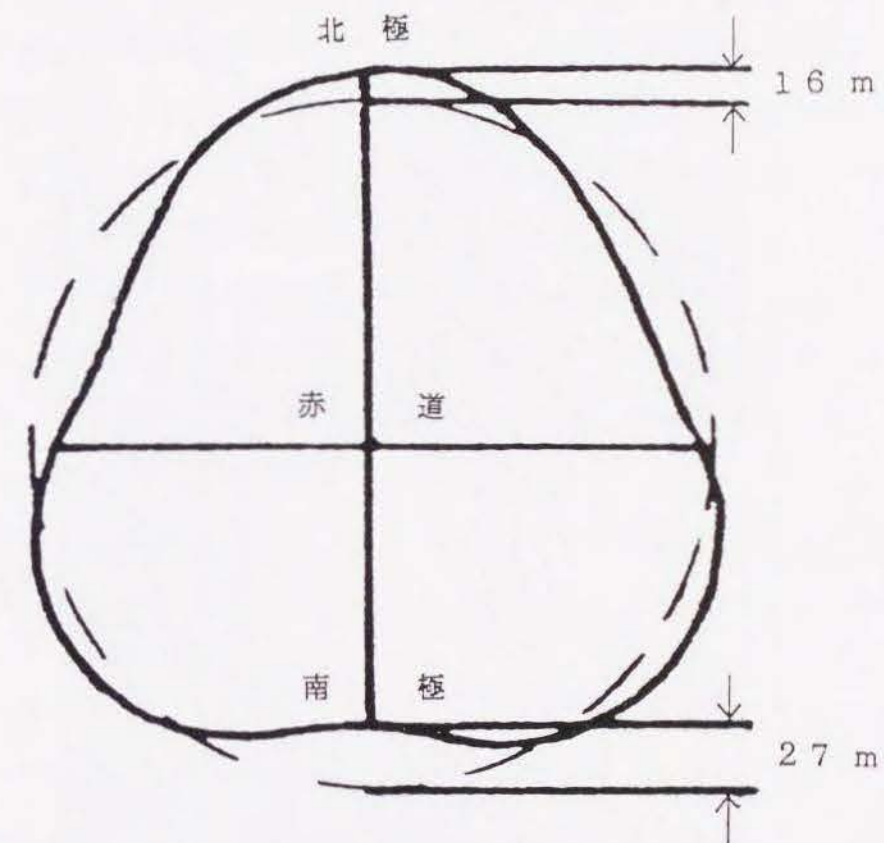


図6-7 地球の形⁶⁹⁾

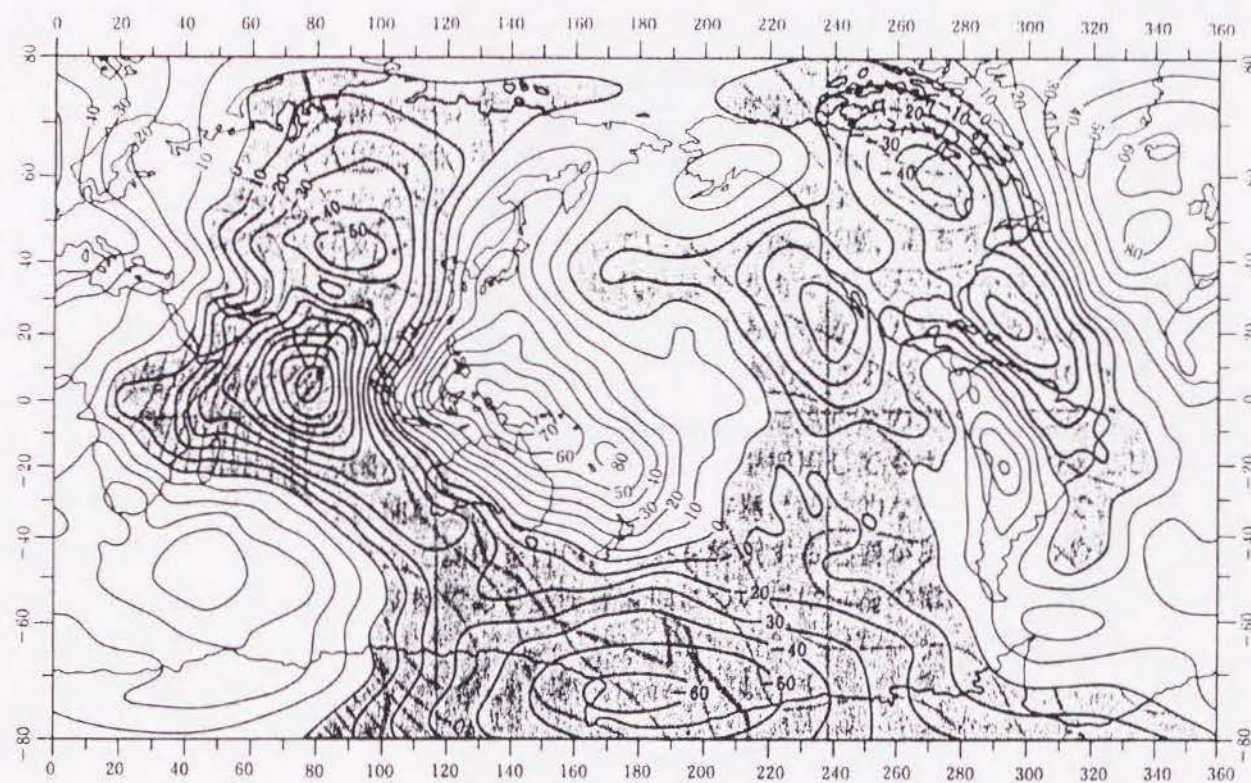


図 6 - 8 ジオイド等高線図⁷⁰⁾

第7章 速力及び方向による測位誤差

7. 1 はじめに

測位の対象物がブイなどの場合は海流や風によって漂流し、ウミガメ、クジラ、イルカなどの生物は自ら回遊するので、これらは移動物体である。従って、測位対象物付近の海流や風の速力と方向、あるいは回遊生物の速力と方向が分かれば測位計算過程上問題はないが、まずそれらのデータは推測のものでしかない。すると、そこに速力と方向の誤差による測位誤差が生じる。これら速力と方向による測位誤差のシミュレーション結果は、すでに詳細に報告^{38), 67)}されている。その報告によると、測位誤差は移動物体の原方向と速力の値に無関係であることが明らかにされ、静止地点において各方向に速力誤差があった場合の測位誤差が示されている。

本章では、静止地点で得た実測の1波処理によるデータに速力と方向に誤差があったときの測位誤差を解析⁷¹⁾し、先に報告されたシミュレーション結果と比較した。

7. 2 移動している測位点の推測位置

NNSSのアルゴリズムでは推測位置をもとにして、正しい位置を求めていくという手順をとっている。移動している測位点であれば計算に用いる時刻ごとに推測位置が必要になる。推測位置そのものは概算のものでよいが、時刻ごとの相対的位置関係は実際の位置関係とできるだけ一致させる必要があり、一致していなければ測位誤差が生じる。

移動している測位点の位置は次式⁶⁸⁾で表すことができる。

$$\phi_{k+1} = \phi_k + tv \cos d \{1 + \delta(1 - 0.5\delta \sin^2 \phi_k)\} / R$$

$$\lambda_{k+1} = \lambda_k + tv \sin d (1 - 0.5\delta \sin^2 \phi_k) / (R \cos \phi_k) \quad (7-1)$$

ここで、 ϕ_k 、 λ_k は t 時間ごとの緯度及び経度である。また、 v と d は速力と方向を表している。 R は地球半径を表し、地球の偏平率を f とすると $\delta = f(2-f)$ となる。

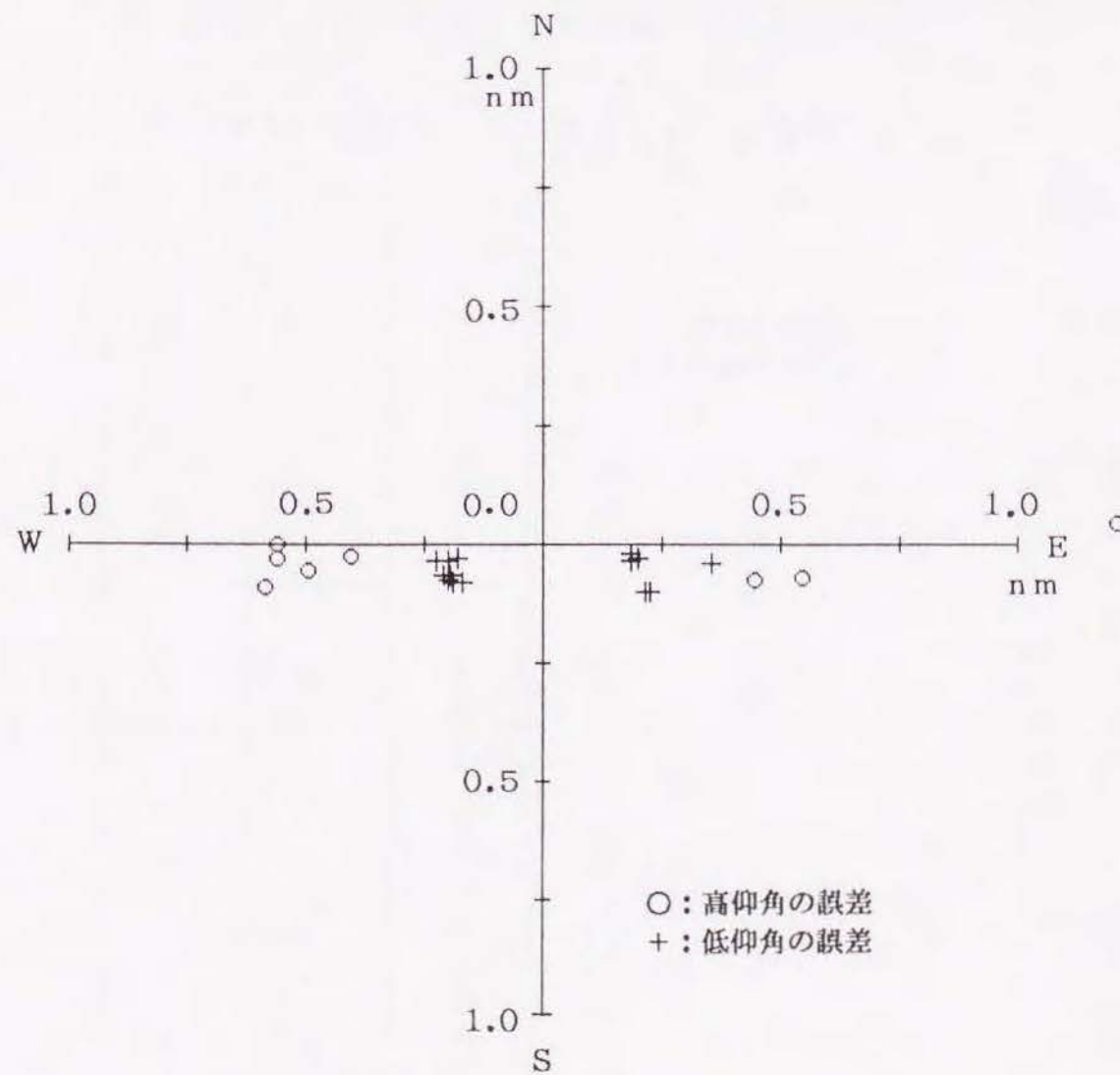
上式により、速力と方向に誤差があれば、時間の経過にしたがって徐々に位置がずれていくことになり、実際の相対的位置関係とかけ離れていくことになる。それが測位誤差の原因となる。

7. 3 実測による測位誤差

速力と方向の誤差との組み合わせは無数にあるので、ここではシミュレーションの結果と比較するために、 1kt の誤差が 0° 方向にあるときと、同じ速力誤差が 90° 方向にあるときの測位誤差を計算した。測定時間は、最接近時刻を挟む6分間とした。

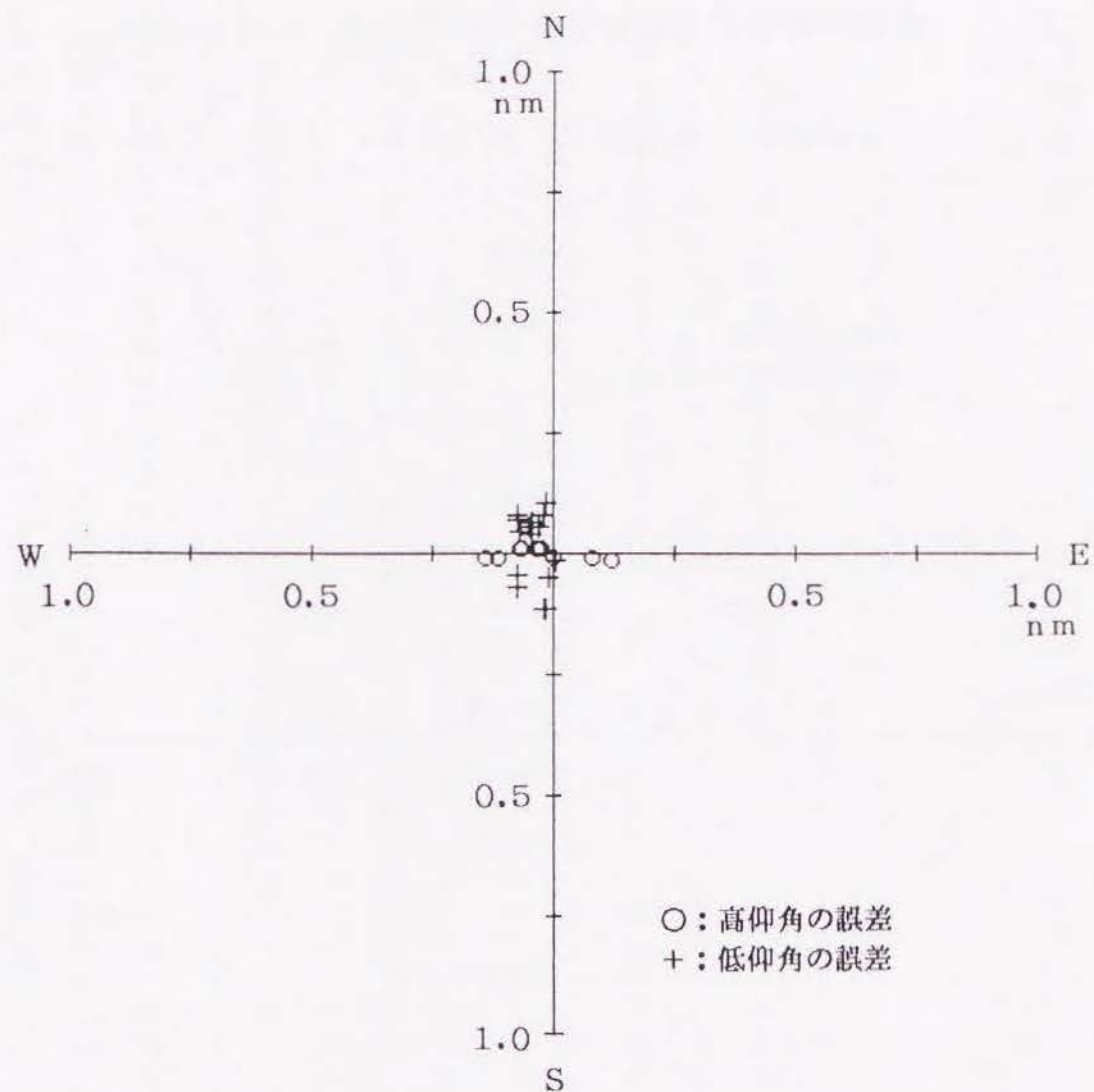
図7-1 (a) は 1kt の誤差が 0° 方向にあるときの測位誤差で (b) は同じ速力誤差が 90° 方向にあるときの測位誤差を示したものである。実測は静止地点であるので、いずれの図も速力のない測位結果からの偏位を測位誤差として示している。方向が 0° のときの測位誤差のうち、図中 (図7-1 (a)) に入りきらない誤差が経度方向で2点ある。測位誤差の統計結果を表7-1に表す。測位誤差が小さいので、誤差の単位は小数第2位まで表している。方向が 0° のときは、高仰角、低仰角とも緯度方向の誤差は 0.2nm 以下となっているが、経度方向の誤差は高仰角で 2nm 近くある。方向が 90° のときは、高仰角、低仰角とも測位誤差は 0.1nm 前後と小さく、その中でも高仰角の緯度方向は 0.02nm と小さい。方向が、 0° から 90° 、さらに 180° と変わる過程では、緯度方向の誤差は仰角によって増減するが、経度方向の誤差はどの仰角でも減っていき、 180° では 0° のときと反対方向の測位誤差になる。このことを図で示すと、図7-2 (a) 及び (b) ³⁸⁾ のようになる。これらの図は、全方向の測位誤差を仰角別に示したものであり、高仰角では低仰角よりも誤差楕円が偏平になる。

図7-3 (a) 及び (b)、また図7-4 (a) 及び (b) は図7-1 (a) 及び (b) の実測結果を仰角別、衛星の軌道別に示したものである。図7-3は



(a) 速力 1 k t、方向 0° の誤差

図 7 - 1 速力及び方向の誤差による測位誤差



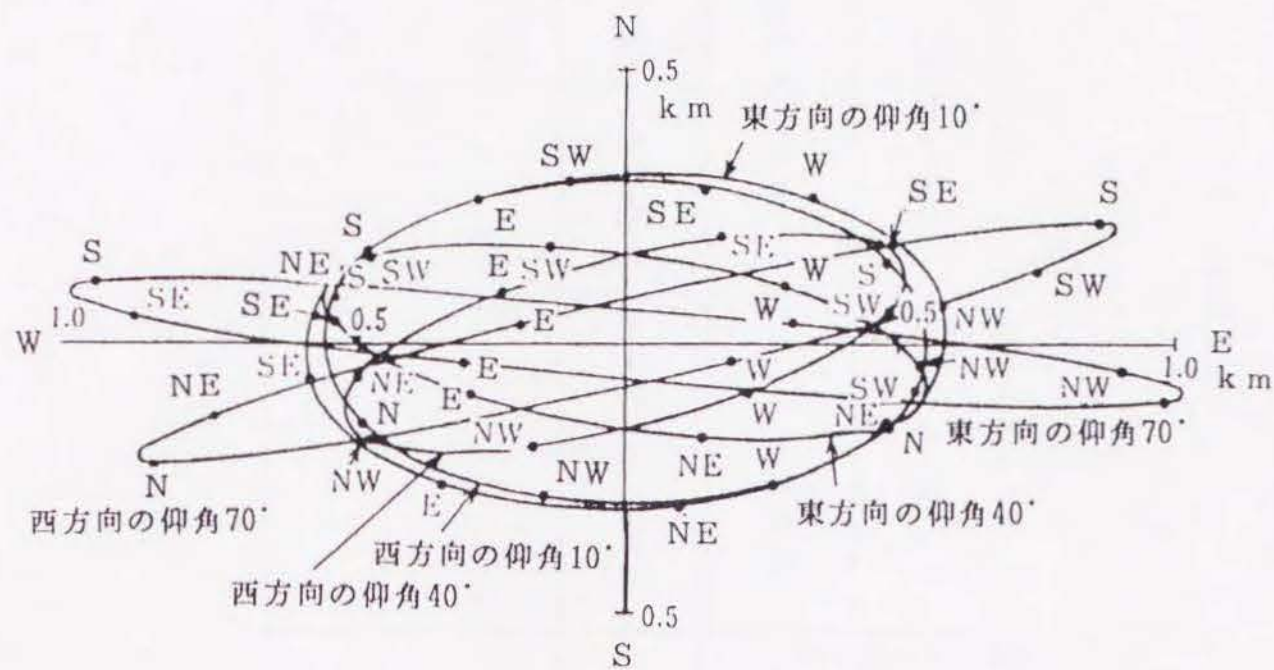
(b) 速力 1 k t、方向 90° の誤差

図 7-1 速力及び方向の誤差による測位誤差

表 7-1 速力と方向による誤差による測位誤差

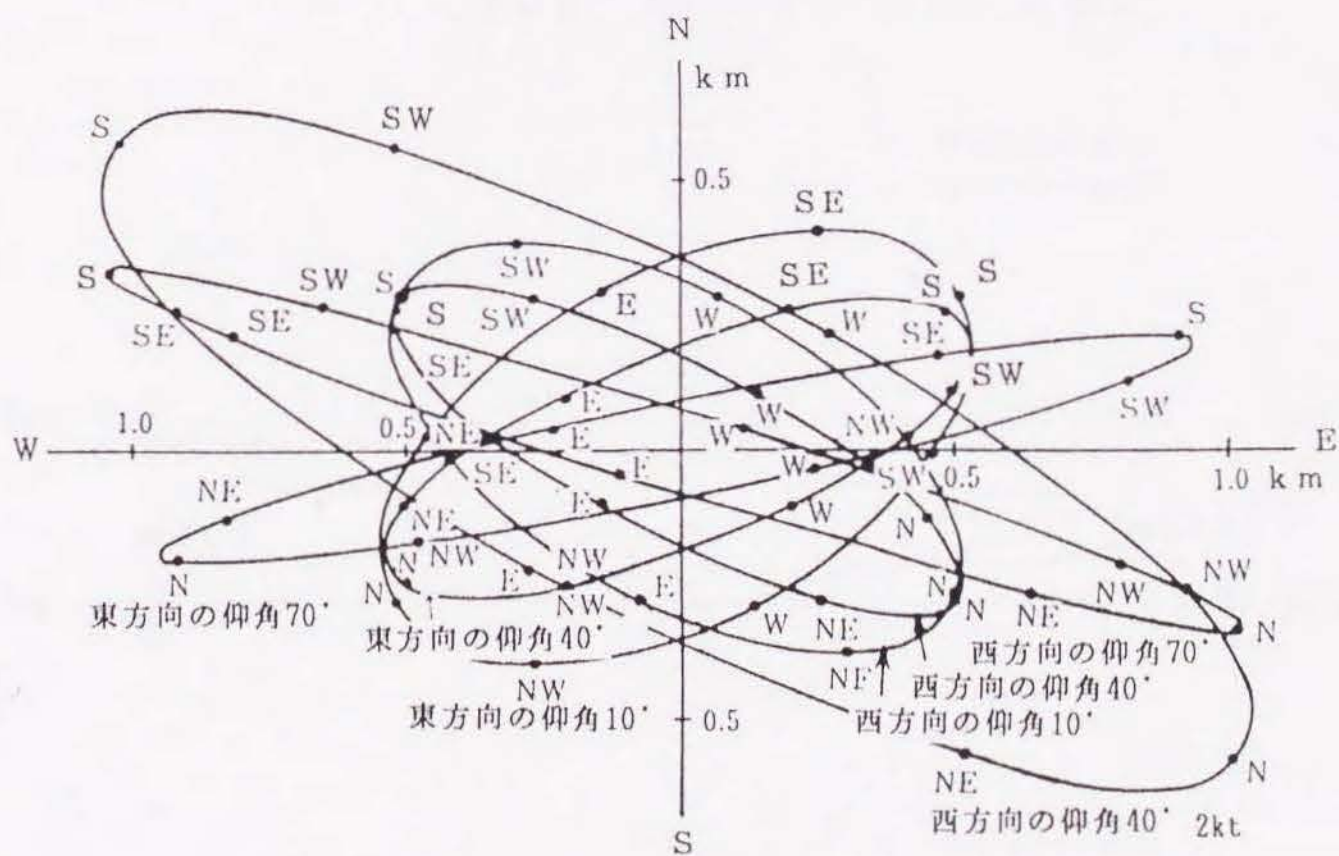
(速力誤差 1 kt)

方 向	測 位 誤 差 (90%確率)			
	緯度方向 (nm)		経度方向 (nm)	
	高仰角	低仰角	高仰角	低仰角
0°	0.16	0.10	1.81	0.35
90°	0.02	0.12	0.13	0.08



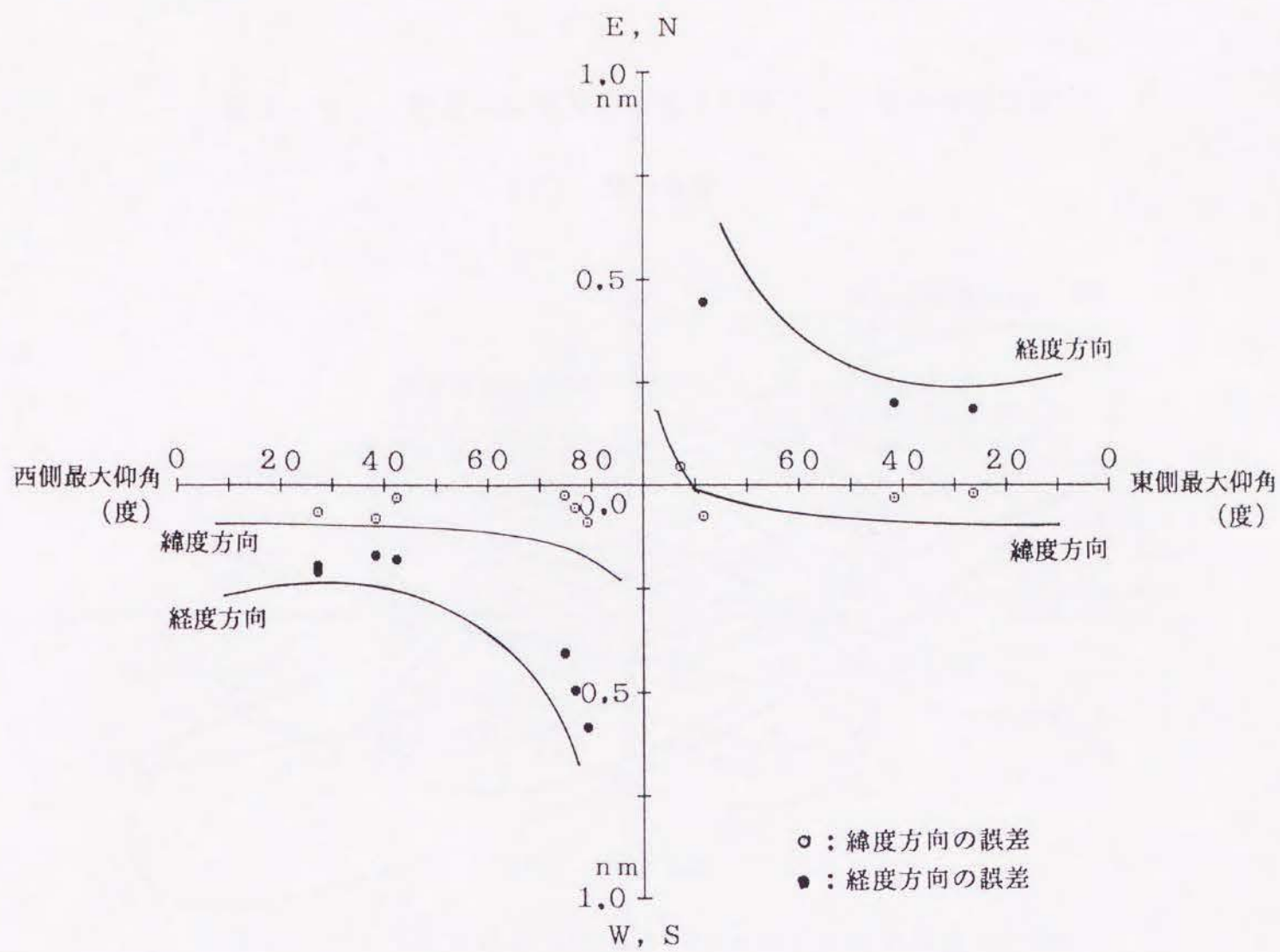
(a) 北上軌道

図7-2 各方向に速力誤差が1ktあったときの測位誤差³⁸⁾



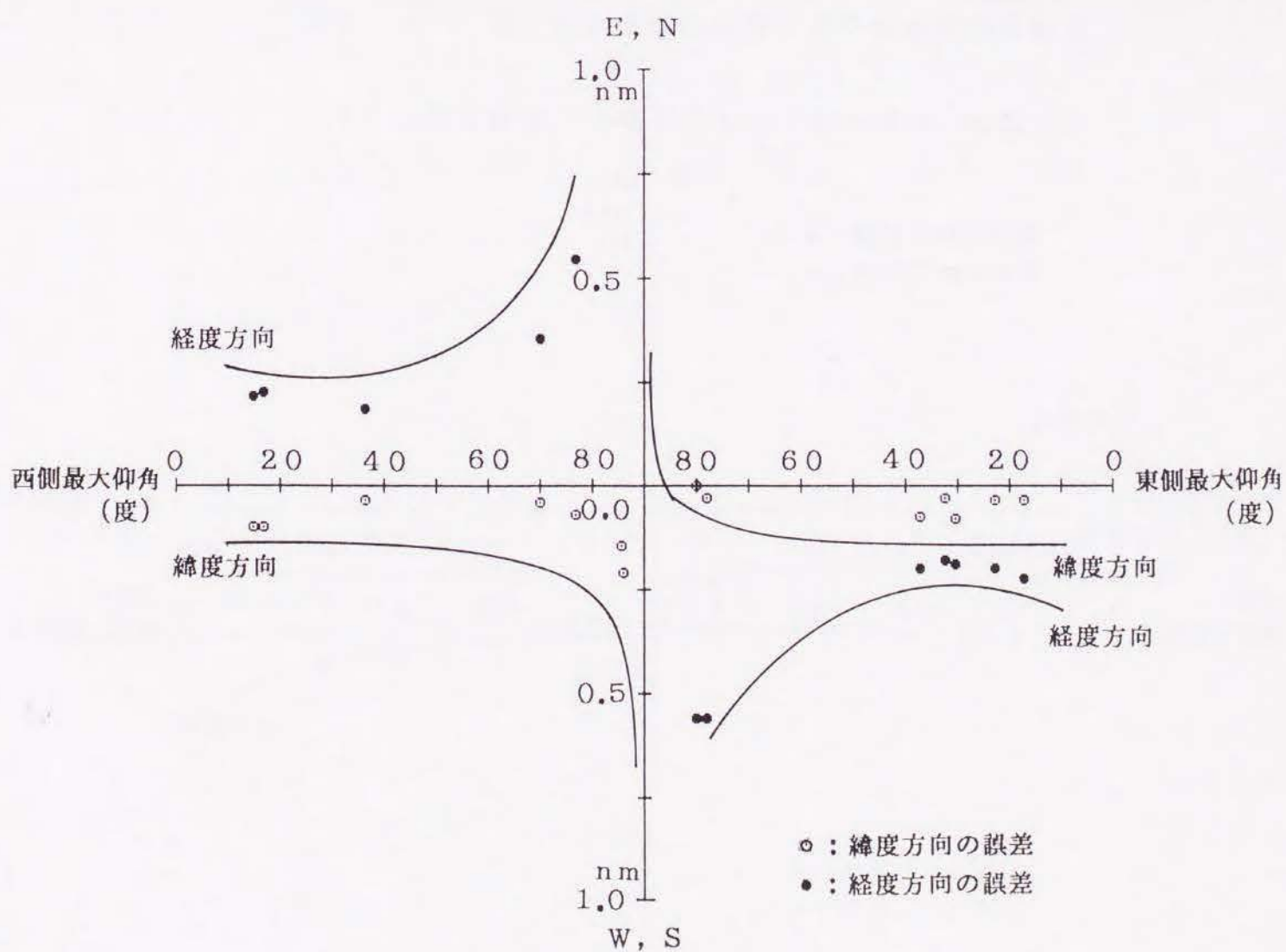
(b) 南下軌道

図7-2 各方向に速力誤差が1ktあったときの測位誤差³⁸⁾



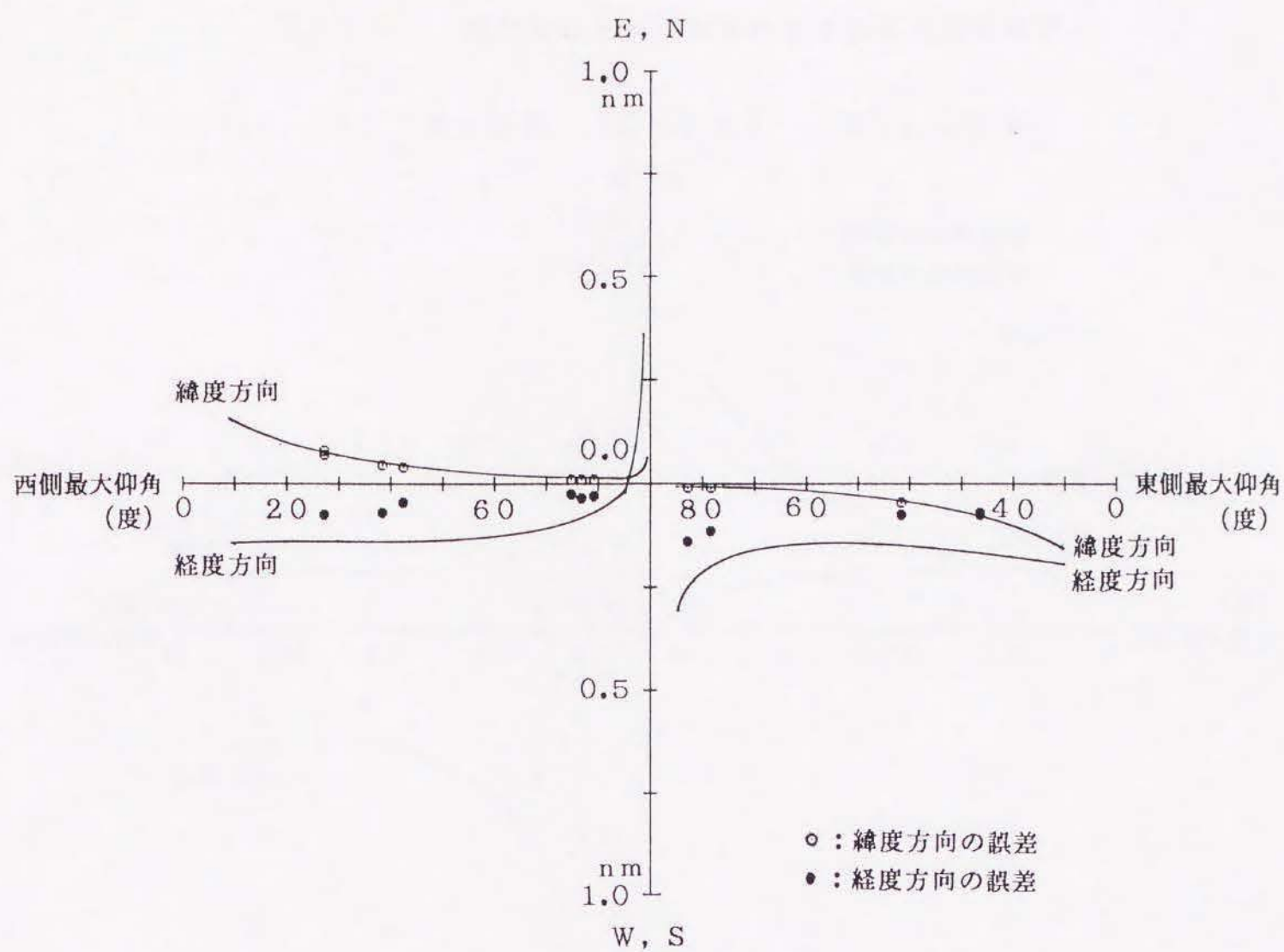
(a) 北上軌道 (速力 1 k t、方向 0° の誤差)

図 7 - 3 速力及び方向の誤差による仰角別測位誤差



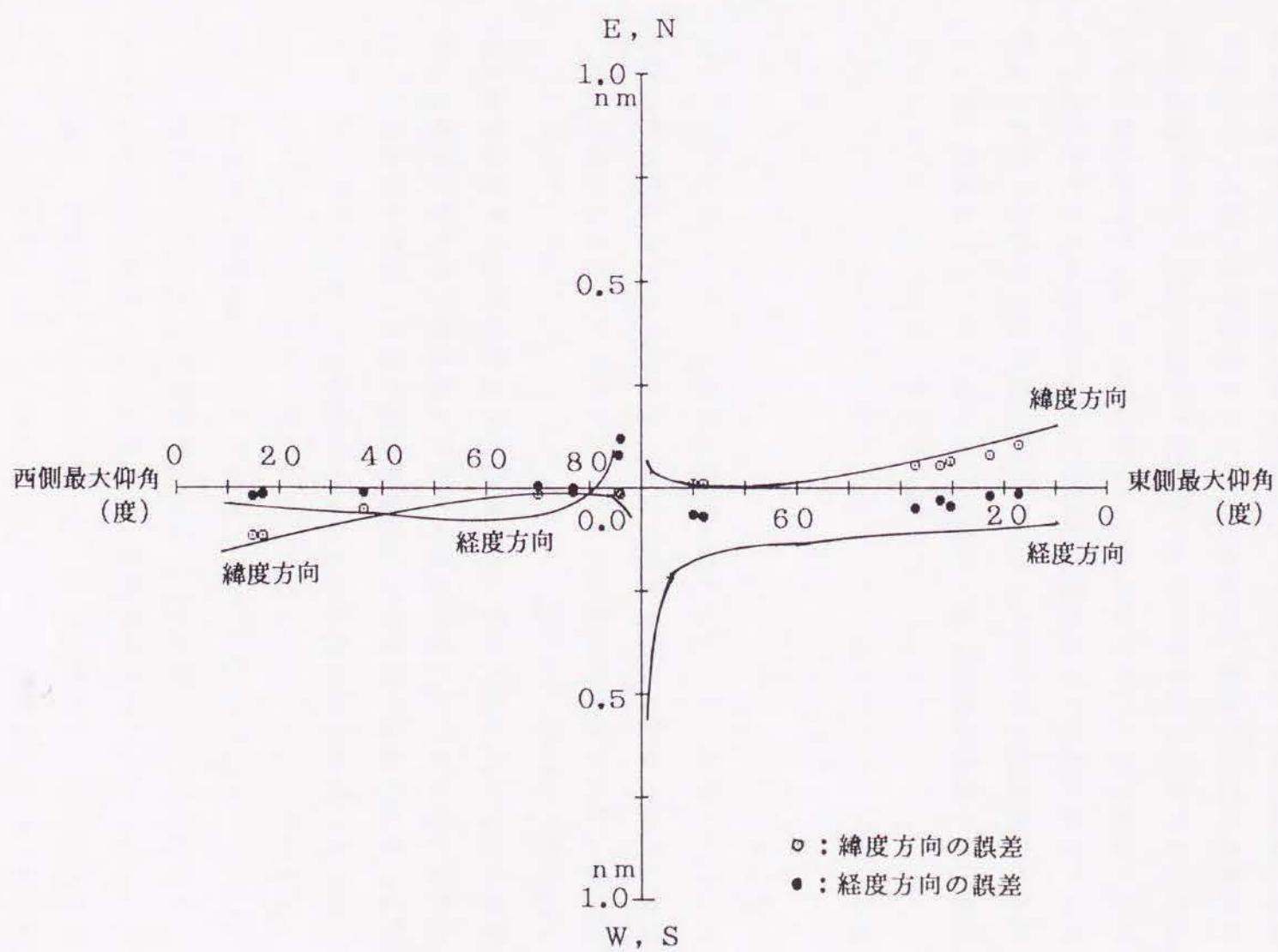
(b) 南下軌道 (速力 1 k t、方向 0° の誤差)

図 7 - 3 速力及び方向の誤差による仰角別測位誤差



(a) 北上軌道 (速力1 k t、方向90°の誤差)

図7-4 速力及び方向の誤差による仰角別測位誤差



(b) 南下軌道 (速力1 k t、方向90°の誤差)

図7-4 速力及び方向の誤差による仰角別測位誤差

0°の方向に速力誤差が1ktあった場合、図7-4は同じ速力誤差が90°の方向にあった場合の仰角別測位誤差を示しており、(a)が北上軌道の場合で(b)が南下軌道の場合である。図7-3においても高仰角で図中に入りきらない誤差が経度方向で2点ある。図中の実線は、計算で求めた理想的なドブラカウムの値を用いて測位誤差を求めたシミュレーションの結果³⁸⁾を示している。実測は前述した通り、1波処理による結果であるので、シミュレーションの結果とは若干の差があるが、その傾向はよく似ている。実測データは仰角が85°までしかないのでこの程度の測位誤差結果になっているが、仰角が90°近くになると緯度、経度方向の誤差とも急激に測位誤差が増えることがシミュレーションで確認されている。

7. 4 まとめ

速力誤差を1ktにして測位誤差を算出したが、速力誤差が倍になると測位誤差もまた倍になり、速力誤差と測位誤差の大きさは比例関係にあることもシミュレーションで確認されている。

測位の対象物により、速力誤差を1kt程度以内に見積もることが難しい場合があり、そのようなときは仰角、方向によって相当な測位誤差が生じることに注意しなければならない。特に、0°または180°方向に速力誤差があると、高仰角では1ktにつき1nm以上の経度方向の誤差がある場合がある。

第8章 総括

推測位置が保持できない測位対象物に対して、まず最接近時刻による方法で位置を求め、それを推測位置としてNNSSのアルゴリズムで再度測位を行って、測位精度の向上をはかるという研究を行った。その結果、次のような原因による測位誤差が解析でき、かつ測位精度の向上がはかれた。なお、最接近時刻による方法で求めた位置の精度は、時刻の決定と周波数の安定度に依存するが、この方法で求めた位置は推測位置として扱うので、多少の誤差はあっても良い。なぜなら、NNSSのアルゴリズムでは、初期値としての推測位置が真位置と数10nmはずれていても、測位精度に影響を及ぼさないからである。

従って、ここでは各章で解析したNNSSのアルゴリズムによる測位精度について述べる。

- (1) 電波伝搬上で生ずる誤差を軽減するために、測定時間を最接近時刻を挟む6分間にした。その結果、測位誤差は高仰角の場合、緯度方向で0.1nm、経度方向で0.3nmとなった。また、低仰角の場合、緯度方向で0.3nm、経度方向で0.3nmとなった。この結果は、送信周波数が一定の場合である。
- (2) 送信周波数が受信中に変化する場合、測定時間が長くなると経度方向に大きな誤差が生じる。送信周波数の変化の割合を 1×10^{-9} /分と仮定した場合、高仰角では、測定時間を最接近時刻を挟む2分間にすると、緯度方向の誤差で0.4nm、経度方向で2.1nmとなった。また、低仰角では、測定時間を余り短くすると測位誤差が大きくなる場合があるので6分間程度とし、その測位誤差は緯度方向で0.4nm、経度方向で0.7nmとなった。このように、衛星仰角によって測定時間を考慮した方が良いことが分かった。
- (3) 軌道情報の中で、1波処理では、衛星の軌道楕円上での左右方向の外れの値を、測位精度には余り影響しないという理由で、測位計算に入れないことがあった。しかし、高仰角の経度方向の誤差で0.06nm(測定時間6分間)程度あるので、少しでも測位精度の向上をはかるならば、左右方向の値も測位計算に入れた方が良いことが分かった。
- (4) アンテナ及びジオイド高さの誤差を10mにすると、その測位誤差は、高仰

角の経度方向で0.1nm程度（測定時間6分間）あるが、高仰角の緯度方向と低仰角の緯度、経度方向では無視できる程であった。測位対象物によっては高さの誤差が大きいと推測される場合もあるが、10m程度の誤差におさえることができれば問題のないことが分かった。

（5）速力の誤差による測位誤差は、方向によって大きく異なり、方向が0°方向、またはその反対の180°方向付近で最も大きく経度方向に誤差が生じる。その測位誤差は、高仰角の場合、1ktの速力誤差で1nm以上もあるが、低仰角では0.4nm程度である。方向が90°、またはその反対の270°付近になると緯度、経度方向とも0.1nm前後である。このように速力の誤差は意外と大きな測位誤差が生じるので、測位対象物が移動している場合、その移動速力と方向をでき得る限りの情報で推測した方が良いことが分かった。

測位精度の比較の対象として、極軌道衛星系EPIRBの測位精度を見ると、2.7nm（90%確率）となっている。本論の解析データでは衛星を見る仰角が90°付近のものがないが、この精度と比較すると、送信周波数の変化があった場合でも、緯度方向では確実に測位精度が向上しており、また測位誤差の大きい高仰角の経度方向でも測位精度は向上している。

ARGOSシステムの方では、測位精度の良いときでNNS程度となっているが、直接ユーザが受信データを解析する場合などにおいては、本論の方法も有効であると考ええる。また、新しいシステムが開発されても、複数の衛星で測位することはあまり考えられないので、本論の方法の活用価値は見いだせるものと考えている。

測位対象物固有のパラメータ（アンテナ高さ、速力、方向）が原因となる測位誤差は、パラメータの推測が比較的容易にできる場合には問題ないが、測位する対象物によってはパラメータの推測値に大きな誤差が含まれる場合があるので、そのときは注意を要する。

なお、衛星を見る仰角が90°に近くなると、NNSのアルゴリズムでは大きな測位誤差が生じたり、計算が収束しなくなる場合があると考えられる。

さらに、今後の測位点の表示方法の提案として、位置を点として表示するだけでなく、測位誤差範囲も含んだ面として表示すれば、測位点の信頼性が増すもの

と考える。

今後、本研究で行った測位方法を、GMDSSのEPIRB（海難通報ブイ）やARGOSシステム（海流やバイオテレメトリー）などで実際に活用することにより、より良い精度の位置が得られることが期待できる。

謝 辞

この研究論文をまとめるにあたり、細部にわたって懇切丁寧な御助言、御指導を戴きました東京水産大学教授濱田悦之先生に深甚なる感謝の意を表します。

また、同大学の小池孝知教授、佐藤要教授、中村善彦教授、柿原利治助教授の諸先生方の御助言に感謝致します。

長年、多岐にわたって御指導、御鞭撻を戴いております東京商船大学名誉教授庄司和民先生に衷心より感謝申し上げます。

弓削商船高等専門学校前校長で神戸商船大学名誉教授樽美幸雄先生の奨励に厚くお礼申し上げます。

また、貴重なる資料、及び御助言を戴きました電子航法研究所元衛星航法部長木村小一先生に心より感謝申し上げます。

最後に、この論文をまとめる時期に何かと便宜をはかって戴いた弓削商船高等専門学校の教職員の方々に感謝申し上げます。

引用文献

第1章の文献

- 1) 茂在寅男. 1979. 古代日本の航海術. 東京. 小学館. pp. 67-80
- 2) 茂在寅男. 1987. 船と古代日本. 東京. PHP研究所. pp. 33-113
- 3) 茂在寅男. 1967. 航海術. 東京. 中央公論社. pp. III-VII
- 4) 桜木幹夫. 1976. ポリネシアの航海術. 東京. pp. 147-182
- 5) The Newspaper Kuokoa. 1865. Ancient Beliefs 33
- 6) John E. Board. 1976. A Low-cost Approach to Small Craft Navigation by Satellite. THE INSTITUTE OF NAVIGATION, NATIONAL MARINE NAVIGATION MEETING. pp. 60-64
- 7) 奥田邦晴. 1987. 船舶用GPS受信装置の測位精度について. 日本航海学会誌. 94. pp. 39-43
- 8) 奥田邦晴. 1988. GPSにおける測位誤差傾向について. 弓削商船高専紀要. 10. pp. 7-12
- 9) 安田明生、平田誠、奥田邦晴、今津隼馬. 1988. GPSにおけるGDOPと測位誤差分布について. 日本航海学会論文集. 79. pp. 25-31
- 10) 奥田邦晴、安田明生. 1982. GPSにおける測位誤差分布について. 電子情報通信学会誌. J75-B-II 2. pp. 138-144
- 11) 奥田邦晴. 1992. GPSにおける衛星配置による測位置の変化. 弓削商船高専紀要. 14. pp. 53-56
- 12) Parker S. Trefethen et al. 1957. Ultrasonic Tracer Follows Tagged Fish. ELECTRONICS. pp. 156-157
- 13) Toshiro Kuroki et al. 1971. A New Telemetric Apparatus to Detect Fish Location and Its Surrounding Water Temperature. Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries. Vol. 37, No. 10. pp. 964-965
- 14) William A. Watkins. 1974. Computer Measurement of Biological Sound-Source Location from Four-Hydrophone Array Data. WOODS HOLE OCEANOGRAPHIC INSTITUTION. WHOI-74-88. pp. 1-4

- 15) 庄司和民、飯島幸人、1992. GMDSS. 東京、成山堂書店. pp.65-103
- 16) 庄司和民、1992. GMDSSにおける衛星利用の現状と将来、衛星と航法シンポジウム、日本航海学会. pp.13-36
- 17) T. Chung & C. R. Carter, 1987. Basic Concepts in the Processing of SARSAT Signals. IEEE. VOL. AES-23, NO. 2. pp.175-197
- 18) キュービック・アイ、1992. アルゴスシステム利用の手引き、キュービック・アイ. pp.1-4
- 19) 落合弘明、鈴木秀司、1984. ARGOSシステムの海洋における利用について、鳥羽商船高専紀要. 6. pp.25-34
- 20) M. A. Schreiber, 1962. Development of a Navigation System Satellite Signal.
- 21) キュービック・アイ、1992. アルゴスシステムガイド、キュービック・アイ. pp.1-9
- 22) N. Levanon & M. Ben-Zaken, 1985. Random Error in ARGOS and SARSAT Satellite positioning Systems. IEEE. VOL. AES-21, NO. 6. pp.783-790
- 23) Hideo Nishida, 1985. A Location Algorithm for DCS Drifting Buoy. REPORT OF HYDROGRAPHIC RESEARCHES. No.20.
- 24) COSPAS-SARSAT PROJECT REPORT. 1985.
- 25) 庄司和民、1974. NNSSによる位置測定結果について、東京商船大学研究報告. 24. pp.15-22
- 26) 奥田邦晴、1980. NNSSによる最近の位置測定結果について、日本航海学会誌. 63. pp.82-86
- 27) 木村小一、1977. 固定地点での測位精度、衛星航法、海文堂. PP.89
- 28) 樽美幸雄、和気博嗣、奥田郁夫、1979. NNSSの定点における測位精度-II. 日本航海学会論文集. 61. pp.11-27
- 29) Toshiharu Kakiyara, Jiro Segawa, 1987. Development of Local User's Terminal and Localization of Data Collection Platform through Translocation Method. Journal of Geodetic Society of Japan Vol.33, No.1. pp.21-32

- 30) Toshiharu Kakiyara, Jiro Segawa, 1989. Positioning Accuracy of the Data Collection Platform through the Translocation and Orbit Correction Method. Journal of Oceanographical Society of Japan Vol. 45. pp.1-10
- 31) 木村小一、1977. NNSSの開発の経過、衛星航法、東京、海文堂. pp.21-26
- 32) G. C. Gutheim, 1967. Program Requirements for Two-Minute Integrated Doppler Satellite Navigation Solution. TG 819-1. Johns Hopkins Univ.
- 33) W. H. Guier & G. C. Weiffenbach, 1960. A Satellite Doppler Navigation System. Proc. of I.R.E
- 34) T. A. Stansell Jr. , 1968. The Navy Navigation Satellite System Discription and Status. NAVIGATION. pp.228
- 35) 木村小一、1968. 人工衛星による航法、電子通信学会誌. 51. pp.883-893
- 36) F. H. Raab, 1976. An Application of the Global Positioning System to Search and Rescue and Remote Tracking. the Institute of Navigation National Marine. pp.65-73
- 37) 庄司和民、1964. トランシット航海衛星方式について、人工衛星と航海. pp.76-79
- 38) 木村小一、伊東実、1973. 船の速力誤差などがNNSSの測位計算に及ぼす影響、電子航法研究所報告. 5. pp.37-43
- 39) 木村小一、1977. NNSS測位誤差の解析、衛星航法、東京、海文堂. pp.97-109
- 40) 沢路和明、1962. 人工衛星の基礎的軌道要素、電波研究所季報. 8, No.34. pp.83-103
- 41) 田尾一彦、1964. 軌道関係一般論、電波研究所季報. 10, No.51. pp.220-237
- 42) 奈須英臣、木村小一、1971. NNSSにおける衛星信号の受信時間の予報とその精度について、日本航海学会論文集. 46. pp.9-16

- 43) K. D. McDonald. 1973. A survey of Satellite-Based Systems for Navigation, Position Surveillance, Traffic Control and Collision Avoidance. NAVIGATION. 20, No. 4
- 44) Defense Mapping Agency. 1972. World Geodetic System. The Department of Defense.
- 45) 木村小一、奈須英臣. 1973. 電波伝搬上の屈折効果がNNSS測位に及ぼす影響. 日本航海学会論文集. 49. pp. 103-108
- 46) 奈須英臣、木村小一. 1974. 電離層屈折によるNNSS測位誤差の一計算方法. 日本航海学会論文集. 52. pp. 117-123
- 47) 奈須英臣、木村小一. 1978. 400MHz 1波NNSS受信測位精度改善の一方法. 日本航海学会論文集. 59. pp. 99-107
- 48) 樽美幸雄、和気博嗣 他. 1980. NNSの定点における測位精度-Ⅲ. 日本航海学会論文集. 62. pp. 23-31
- 49) 奥田邦晴. 1982. NNS測位精度向上のための受信データ処理方法. 弓削商船高専紀要. 4. pp. 37-47
- 50) 奥田邦晴. 1984. NNSにおけるドブラカウムの誤差について. 弓削商船高専紀要. 6. pp. 1-7
- 51) 木村小一. 1971. 船の速力誤差などがNNSSの測位計算に及ぼす影響. 日本航海学会論文集. 46. pp. 1-8
- 52) 奥田邦晴. 1979. ジオイド高さの影響によるNNSSの位置精度について. 弓削商船高専紀要. 創刊. pp. 11-18
- 53) 奥田邦晴、庄司和民. 1979. NNSにおけるアンテナ高とジオイド高の入力について. 日本航海学会誌. 60. pp. 44-48
- 54) 奥田邦晴. 1980. NNSにおけるアンテナ高とジオイド高による測位誤差. 弓削商船高専紀要. 2. pp. 27-35
- 55) 木村小一. 1977. 人工衛星からの電波のドブラ効果を使って船位を求める可能性. 衛星航法. 東京. 海文堂. pp. 28-30
- 56) Kuniharu Okuda, Etsuyuki Hamada. 1995. A Consideration on Positioning Method by Doppler Type Satellite. MEMOIRS of the YUGE NATIONAL COLLEGE OF MARITIME TECHNOLOGY. 17. pp. 117-120

- 57) 奥田邦晴、濱田悦之. 1995. 極軌道衛星系EPIRBの測位精度の向上について. 日本航海学会論文集. 92. pp. 1-8
- 58) 小塩立吉. 1993. 短予熱時間高安定OCXOを用いた406MHz衛星系イーパブとその測位精度について. 日本航海学会論文集. 88. pp. 269-277

第2章の文献

- 25) 庄司和民. 1974. NNSによる位置測定結果について. 東京商船大学研究報告. 24. pp. 15-22
- 26) 奥田邦晴. 1980. NNSの最近の位置測定結果について. 日本航海学会誌. 63. pp. 82-86
- 55) 木村小一. 1977. 人工衛星からの電波のドブラ効果を使って船位を求める可能性. 衛星航法. 東京. 海文堂. pp. 28-30
- 57) 奥田邦晴、濱田悦之. 1995. 極軌道衛星系EPIRBの測位精度の向上について. 日本航海学会論文集. 92. pp. 1-8
- 58) 小塩立吉. 1993. 短予熱時間高安定OCXOを用いた406MHz衛星系イーパブとその測位精度について. 日本航海学会論文集. 88. pp. 269-277
- 59) 例えば木村小一. 1977. NNSによる測位の原理. 衛星航法. 東京. 海文堂. pp. 30-33
- 60) 日比野省三、中田友一. 1976. 相関と回帰分析. コンピュータ統計概論. 東京. 福村出版. pp. 120-150
- 61) 片桐重延 他. 1977. 多項式近似. 数値計算. 東京. 東京電気大学出版局. pp. 53-80

第3章の文献

- 49) 奥田邦晴. 1982. NNS測位精度向上のための受信データ処理方法. 弓削商船高専紀要. 4. pp. 37-47
- 50) 奥田邦晴. 1984. NNSにおけるドブラカウムの誤差について. 弓削商船高専紀要. 6. pp. 1-7

- 57) 奥田邦晴、濱田悦之. 1995. 極軌道衛星系EPIRBの測位精度の向上について. 日本航海学会論文集. 92. pp.1-8
- 62) 木村小一. 1977. 電波伝搬上で生ずる誤差. 東京. 衛星航法. pp.99-104
- 63) 木村小一. 1973. NNSSの概要とその現状. 電子航法研究所報告. 5. pp.6-13

第4章の文献

- 16) 庄司和民. 1992. GMDSSにおける衛星利用の現状と将来. 衛星と航法シンポジウム. 日本航海学会. pp.13-36
- 57) 奥田邦晴、濱田悦之. 1995. 極軌道衛星系EPIRBの測位精度の向上について. 日本航海学会論文集. 92. pp.1-9
- 58) 小塩立吉. 1993. 短予熱時間高安定OCXOを用いた406MHz衛星系イーパブとその測位精度について. 日本航海学会論文集. 88. pp.269-277

第5章の文献

- 42) 奈須英臣、木村小一. 1971. NNSSにおける衛星信号の受信時間の予報とその精度について. 日本航海学会論文集. 46. pp.9-16
- 43) K. D. McDonald. 1973. A survey of Satellite-Based Systems for Navigation, Position Surveillance, Traffic Control and Collision Avoidance. NAVIGATION. 20, No.4
- 44) Defense Mapping Agency. 1972. World Geodetic System. The Department of Defense.
- 64) 木村小一. 1977. 衛星の軌道予報値の誤差. 衛星航法. 東京. 海文堂. pp.104-105
- 65) 木村小一. 1977. 衛星位置の計算. 衛星航法. 東京. 海文堂. pp.58-61
- 66) 奥田邦晴、庄司和民. 1979. NNSSの位置誤差について - 衛星の横方向の外れに関して -. 日本航海学会論文集. 61. pp.1-10

第6章の文献

- 38) 木村小一、伊藤実. 1973. 船の速力誤差などがNNSSの測位計算に及ぼす影響. 電子航法研究所報告. 5. pp.37-43
- 52) 奥田邦晴. 1979. ジオイド高さの影響によるNNSSの位置精度について. 弓削商船高専紀要. 創刊. pp.11-18
- 53) 奥田邦晴、庄司和民. 1979. NNSSにおけるアンテナ高とジオイド高の入力について. 日本航海学会誌. 60. pp.44-48
- 54) 奥田邦晴. 1980. NNSSにおけるアンテナ高とジオイド高による測位誤差 - シミュレーションによる結果 -. 弓削商船高専紀要. 2. pp.27-35
- 67) D. W. R. Denzler. 1973. ACCURACY, Evaluation of the Transim Low-Cost Satellite Navigation System. THE JOHNS HOPKINS UNIVERSITY. pp.54-57
- 68) 木村小一. 1977. 受信点の推測位置の計算. 衛星航法. 東京. 海文堂. pp.61-62
- 69) 古在由秀. 1973. 地球をはかる. 岩波科学の本7. 東京. 岩波書店. pp.129-137
- 70) 日本測地学会. 1989. GPS - 人工衛星による精密測位システム -. 日本測量協会. pp.169-171

第7章の文献

- 38) 木村小一、伊藤実. 1973. 船の速力誤差などがNNSSの測位計算に及ぼす影響. 電子航法研究所報告. 5. pp.37-43
- 67) D. W. R. Denzler. 1973. ACCURACY, Evaluation of the Transim Low-Cost Satellite Navigation System. THE JOHNS HOPKINS UNIVERSITY. pp.60-64
- 68) 木村小一. 1977. 受信点の推測位置の計算. 衛星航法. 東京. 海文堂. pp.61-62
- 71) 奥田邦晴. 受理. - 衛星システムによる測位誤差 - 速力と方向による誤差について -. 弓削商船高専紀要. 18

付 録

目 次

1. ドブラカウントデータ受信例	128
2. プログラム例	
2.1 衛星予報計算	129
2.2 計算によるドブラ曲線	131
2.3 ドブラ曲線の微分値のファイル作成	133
2.4 ドブラ曲線の3次近似曲線	134
2.5 ニュートン法によるドブラ曲線の補間	136
2.6 ラグランジュ法によるドブラ曲線の補間	137
2.7 最接近時刻を求める計算	138
2.8 最接近時刻法による測位計算	140
2.9 N N S S のアルゴリズムによる測位計算	143
2.10 ドブラ周波数の誤差	146
2.11 送信周波数が変化したときのドブラカウント データの作成	148

1000 DATA 130991#, 131213#, 131438#, 131669#, 131903#, 132141#, 132385#, 132632#
1010 DATA 132883#, 133140#, 133400#, 133666#, 133934#, 134210#, 134489#, 134771#
1020 DATA 135061#, 135353#, 135652#, 135954#, 136261#, 136573#, 136889#, 137211#
1030 DATA 137538#, 149078#
1040 DATA 138237#, 138575#, 138920#, 139271#, 139627#, 139988#, 140352#, 140723#
1050 DATA 141097#, 141475#, 141859#, 142248#, 142640#, 143035#, 143437#, 143842#
1060 DATA 144250#, 144664#, 145079#, 145500#, 145924#, 146351#, 146782#, 147216#
1070 DATA 147654#, 160138#
1080 DATA 148573#, 149019#, 149467#, 149918#, 150371#, 150826#, 151284#, 151742#
1090 DATA 152202#, 152663#, 153125#, 153589#, 154052#, 154517#, 154982#, 155447#
1100 DATA 155910#, 156377#, 156840#, 157303#, 157767#, 158228#, 158688#, 159147#
1110 DATA 159606#, 173077#
1120 DATA 160551#, 161003#, 161451#, 161900#, 162343#, 162785#, 163223#, 163659#
1130 DATA 164091#, 164520#, 164945#, 165367#, 165785#, 166200#, 166610#, 167017#
1140 DATA 167419#, 167817#, 168211#, 168601#, 168985#, 169365#, 169741#, 170111#
1150 DATA 170478#, 184728#
1160 DATA 171225#, 171578#, 171925#, 172268#, 172606#, 172939#, 173265#, 173591#
1170 DATA 173907#, 174222#, 174531#, 174834#, 175133#, 175427#, 175716#, 176000#
1180 DATA 176280#, 176556#, 176825#, 177092#, 177354#, 177609#, 177863#, 178110#
1190 DATA 178353#, 193104#
1200 DATA 178845#, 179076#, 179301#, 179525#, 179741#, 179954#, 180165#, 180369#
1210 DATA 180571#, 180759#, 180962#, 181152#, 181339#, 181522#, 181700#, 181876#
1220 DATA 182047#, 182217#, 182381#, 182544#, 182702#, 182855#, 183006#, 183154#
1230 DATA 183299#, 198342#

2. プログラム例

2. 1 衛星予報計算

```

10 *****
20 ***** ALART CALCULATION *****
30 DIM DT#(10),M#(10),E#(10),A#(10),U#(10),V#(10)
40 DIM O#(10),W#(10),B#(10),X#(10),Y#(10)
50 DIM XS#(10),YS#(10),ZS#(10),XN#(10),YN#(10),ZN#(10)
60 DIM XST#(10),YST#(10),ZST#(10),S#(10),ST#(10)
70 DIM XD#(10),YD#(10),ZD#(10),XDT#(10),YDT#(10),ZDT#(10)
80 DIM DC#(10),DCT#(10),DXN#(8),DYN#(8),DZN#(8)
90 DIM AC#(8,4),SC#(8,4),DSA#(8),DSO#(8)
100 ***** INPUT DATA *****
110 READ TP#,N#,WO#,WD#,EP#,AO#,OO#,OD#,CO#,AG#,SI#
120 READ TO#,LA#,LO#,H#
130 *****
140 RAD#=3.141592653#/180#
150 WE#=.25068448#
160 RO#=6378.137#
170 F#=1#/298.257223#
180 DTP#=TO#-TP#
190 IF DTP# <= -480# THEN DTP#=DTP#+1440# : GOTO 240
200 T#=360#/N#
210 TR#=1440#-T#
220 IF DTP# > -480 AND DTP# < TR# THEN DTP#=DTP# : GOTO 240
230 IF DTP# >= TR# THEN DTP#=DTP#-1440#
240 KT#=0
250 DT#=DTP#+KT#/60#
260 M#=N#*DT#
270 E#=M#*RAD#+EP#*SIN(M#*RAD#)
280 A#=AO#
290 U#=A#*(COS(E#)-EP#)
300 V#=A#*SIN(E#)
310 O#=OO#+OD#*DT#
320 W#=(WO#-ABS(WD#)*DT#)*RAD#
330 B#=(O#-AG#-WE#*DT#)*RAD#
340 X#=U#*COS(W#)-V#*SIN(W#)
350 Y#=U#*SIN(W#)+V#*COS(W#)
360 XST#=X#*COS(B#)-Y#*COS#*SIN(B#)
370 YST#=X#*SIN(B#)+Y#*COS#*COS(B#)
380 ZST#=Y#*SI#
390 ZS#(1)=Y#*SI#
400 IF KT# > 0 THEN ZSS#=ZS#(1)-ZS#(0)
410 ZS#(0)=ZS#(1)
420 D#=SQR(COS(LA#*RAD#)^2+(1#-F#)^2*SIN(LA#*RAD#)^2)
430 XN#=(RO#/D#+H#)*COS(LA#*RAD#)*COS(LO#*RAD#)
440 YN#=(RO#/D#+H#)*COS(LA#*RAD#)*SIN(LO#*RAD#)
450 ZN#=(RO#*(1-F#)^2/D#+H#)*SIN(LA#*RAD#)
460 XDT#=XST#-XN#
470 YDT#=YST#-YN#
480 ZDT#=ZST#-ZN#
490 ST#(1)=SQR(XDT#^2+YDT#^2+ZDT#^2)
500 IF KT# > 0 THEN DCT#=ST#(1)-ST#(0)

```

```

510 ST#(0)=ST#(1)
520 RN#=SQR(XN#^2+YN#^2+ZN#^2)
530 ELE#=(XDT#*XN#+YDT#*YN#+ZDT#*ZN#)/(ST#(0)*RN#)
540 ELEC#=SQR(1#-ELE#^2)
550 EL#(1)=ATN(ELE#/ELEC#)/RAD#
560 IF KT# > 0 THEN ELS#=EL#(1)-EL#(0)
570 EL#(0)=EL#(1)
580 IF EL#(0) > 0 AND ELS# < 0 THEN 590 ELSE 690
590 JIK#=TO#+KT#/60
600 JID%=FIX(JIK#) ¥ 1440
610 JIH%=FIX((JIK#-1440*JID%)) ¥ 60
620 JIM =JIK#-1440*JID%-60*JIH%
630 PRINT USING "####";JID%,JIH%;:PRINT USING "####.#";JIM;
640 PRINT USING "#####.###";EL#(1);
650 IF ZSS# > 0 THEN TUKs="N" ELSE TUKs="S"
660 IF ATN(YST#/XST#)-ATN(YN#/XN#) > 0 THEN TNES="E"
    ELSE TNES="W"
670 PRINT " ";TUKs;" - ";TNES
680 KT#=KT#+5400#
690 IF EL#(0) > 0 THEN KT#=KT#+1 ELSE KT#=KT#+120
700 GOTO 250
710 END

```


2. 2 計算によるドブラ曲線

```

10 *****
20 ***** DOPPLER CURVE *****
30 DIM ST$(10)
40 DIM DA$(10),DE$(10),ET$(10)
50 SCREEN 3,0
60 ***** DATA *****
70 READ TP#,N#,WO#,WD#,EP#,AO#,OO#,OD#,CO#,AG#,SI#
80 READ TO#,LA#,LO#,H#
90 LAT#=LA# : LOT#=LO#
100 FOR K=0 TO 7
110 READ DE$(K)
120 NEXT K
130 FOR K=0 TO 7
140 READ DA$(K)
150 NEXT K
160 FOR K=0 TO 7
170 READ ET$(K)
180 NEXT K
190 *****
200 RAD#=3.141592653#/180#
210 WE#=.25068448#
220 RO#=6378.135#
230 F#=1#/298.26#
240 DTP#=TO#-TP#
250 IF DTP# <= -480# THEN DTP#=DTP#+1440# : GOTO 300
260 T#=360#/N#
270 TR#=1440#-T#
280 IF DTP# > -480 AND DTP# < TR# THEN DTP#=DTP# : GOTO 300
290 IF DTP# >= TR# THEN DTP#=DTP#-1440# : GOTO 300
300 *****
310 FOR K=0 TO 6
320 FOR KK=0 TO 119
330 KKK=KK*10*1!
340 DT#=DTP#+2#*K+1!*KK/60#
350 GOSUB *SATE
360 GOSUB *RPOS
370 ST$(1)=SQR(XDT#^2+YDT#^2+ZDT#^2)
380 IF KK=0 THEN 390 ELSE DCT#=ST$(1)-ST$(0)
390 ST$(0)=ST$(1)
400 IF KK=0 THEN 440 ELSE 410
410 DCO#=(DCT#+1!*0.00074948125#*32000#)/.00074948125#
420 IF KK=1 THEN PSET(100+K*120/2+KK/2,200-(32000#-DCO#/1!)/50),3
430 LINE -(100+K*120/2+KK/2,200-(32000#-DCO#/1!)/50),3
440 NEXT KK
450 NEXT K

```

```

460 *****
470 LINE(100, 0)-(100,399)
480 LINE(100,200)-(580,200)
490 FOR K=0 TO 8
500 LINE(100+K*60,198)-(100+K*60,202)
510 NEXT K
520 FOR K=0 TO 4
530 LINE(100,100*K)-(104,100*K)
540 NEXT K
550 END
560 *****
570 *SATE
580 M#=N#*DT#
590 E#=M#*RAD#+EP#*SIN(M#*RAD#)+(DE$(K)
+KKK*(DE$(K+1)-DE$(K))/1200#)*RAD#
600 A#=AO#+(DA$(K)+KKK*(DA$(K+1)-DA$(K))/1200#)
610 U#=A#*(COS(E#)-EP#)
620 V#=A#*SIN(E#)
630 O#=OO#+OD#*DT#
640 W#=(WO#-ABS(WD#)*DT#)*RAD#
650 B#=(O#-AG#-WE#*DT#)*RAD#
660 X#=U#*COS(W#)-V#*SIN(W#)
670 Y#=U#*SIN(W#)+V#*COS(W#)
680 Z#=ET$(K)+KKK*(ET$(K+1)-ET$(K))/1200#
690 XST#=X#*COS(B#)-Y#*CO#*SIN(B#)+Z#*SI#*SIN(B#)
700 YST#=X#*SIN(B#)+Y#*CO#*COS(B#)-Z#*SI#*COS(B#)
710 ZST#=Y#*SI#+Z#*CO#
720 RETURN
730 *****
740 *RPOS
750 D#=SQR(COS(LA#*RAD#)^2+(1#-F#)^2*SIN(LA#*RAD#)^2)
760 XN#=(RO#/D#+H#)*COS(LA#*RAD#)*COS(LO#*RAD#)
770 YN#=(RO#/D#+H#)*COS(LA#*RAD#)*SIN(LO#*RAD#)
780 ZN#=(RO#*(1-F#)^2/D#+H#)*SIN(LA#*RAD#)
790 XDT#=XST#-XN#
800 YDT#=YST#-YN#
810 ZDT#=ZST#-ZN#
820 RETURN
830 *****
840 DATA 395.7843#,3.3687505#,166.0464#,0.0020035#,
0.001941#,7459.61#
850 DATA 220.4686#,-0.0000223#,0.005785#,135.2283#,0.999983#
860 DATA 918#,34.1577#,125#,0.050#
870 DATA -0.0021#,-0.0023#,-0.0021#,-0.0017#,-0.0009#,0.0002#,
0.0015#,0.0000#
880 DATA 0.83#,1.16#,1.50#,1.84#,2.15#,2.42#,2.63#,0.00#
890 DATA 0.025#,0.020#,0.015#,0.010#,0.000#,-0.010#,
-0.020#,0.000#

```


2. 3 ドブラ曲線の微分値のファイル作成

```

10 '*****
20 '***** FILE (BIBUN) *****
30 SCREEN 3,0
40 OPEN "2:NSF10.DAT" FOR OUTPUT AS #1 : '//////////
50 DIM FD1#(200),RS#(200),B1#(200),B2#(200)
60 FOR K=1 TO 156 : '//////////
70   READ FD#
80   IF K MOD 26 = 0 THEN 120
90   FD1#(K)=FD#/(28080#/6103#)
100  RS#(K)=(K#26)*120#+(K MOD 26)*28080#/6103#-14040#/6103#
110  GOTO 130
120  FD1#(K)=FD#/(30360#/6103#)
130  RS#(K)=(K#26)*120#-15180#/6103#
140 NEXT K
150 FOR K=1 TO 156 : '//////////
160   B1#(K+1)=(FD1#(K)-FD1#(K+1))/(RS#(K+1)-RS#(K))
170 NEXT K
180 FOR K=2 TO 155 : '//////////
190   RS2#=(RS#(K)-RS#(K-1))/2#+(RS#(K+1)-RS#(K))/2#
200   B2#(K+1)=(B1#(K+1)-B1#(K))/RS2#
210 NEXT K
220 FOR K= 1 TO 156 : '//////////
230   WRITE #1,RS#(K),FD1#(K),B1#(K),B2#(K)
240 NEXT K
250 END

```

2. 4 ドブラ曲線の3次近似曲線

```

10 '*****
20 '**** RENRITU HOTEISHIKI(3J1) WO TOKU ****
30 SCREEN 3,0
40 DIM SC#(210,5),A#(210,5)
50 N=4
60 M=N+1
70 L=75
80 EPS#=1D-38
90 '*** GOMI TORI ****
100 FOR K=1 TO N
110   FOR J=1 TO M
120     A#(K,J)=0#
130   NEXT J,K
140 '**** SC GYOURETSU ****
150 LL=1
160 FOR K=0 TO 2 STEP 1
170   FOR I=1 TO 25
180     READ DOC#
190     DTIM#=28080#/6103#*(I-1)+120*K
200     SDOC#=32000#-DOC#/(28080#/6103#)
210     PRINT DTIM#;SDOC#
220     PSET(70+DTIM#,200-SDOC#/100),5
230     SC#(LL,1)=DTIM#^3
240     SC#(LL,2)=DTIM#^2
250     SC#(LL,3)=DTIM#
260     SC#(LL,4)= 1
270     SC#(LL,5)= SDOC#
280     LL=LL+1
290   NEXT I
300 NEXT K
310 '*** A GYOURETSU (SEIKI HOTEISHIKI) ***
320 FOR J=1 TO M
330   FOR I=1 TO N
340     FOR K=1 TO L
350       A#(I,J)=A#(I,J)+SC#(K,J)*SC#(K,I)
360     NEXT K
370   NEXT I
380 NEXT J
390 END

```



```

390 '**** SAISHOU JIJYOUHOU ****
400 FOR K=1 TO N
410   W#=A#(K,K)
420   AW#=ABS(W#)
430   IF AW# < EPS# THEN PRINT K;" ILL CONDITION" : END
440   FOR J=K TO M
450     A#(K,J)=A#(K,J)/W#
460   NEXT J
470   FOR I=1 TO N
480     IF I = K THEN 530
490     W#=A#(I,K)
500     FOR J=K TO M
510       A#(I,J)=A#(I,J)-W#*A#(K,J)
520     NEXT J
530   NEXT I
540 NEXT K
550 '***** KAI PRINT *****
560 FOR I=1 TO N
570   PRINT I;A#(I,M)
580 NEXT I
590 FOR TI=2.3 TO 352.7 STEP .1
600   DCC#=A#(1,M)*TI^3+A#(2,M)*TI^2+A#(3,M)*TI+A#(4,M)
610   PSET(70+TI,200-DCC#/100),6
620   BIBUN#=3*A#(1,M)*TI^2+2*A#(2,M)*TI+A#(3,M)
630   BIBU2#=6*A#(1,M)*TI+2*A#(2,M)
640   PSET(70+TI,200-BIBUN#),2
650   PSET(70+TI,200-BIBU2#*100),3
660   PRINT TI;:PRINT USING "#####.#####";DCC#;BIBUN#;BIBU2#
670 NEXT TI
680 END

```

2. 5 ニュートン法によるドブラ曲線の補間

```

10 '*****
20 '***** NEWTON *****
30 DIM Y#(5)
40 FOR L=0 TO 4
50   READ DC#
60   Y#(L)=32000#-DC#/4.6#
70 NEXT L
80 FOR M=1 TO 10
90   DY0=Y#(1)-Y#(0):DY1=Y#(2)-Y#(1)
100  DY2=Y#(3)-Y#(2):DY3=Y#(4)-Y#(3)
110  D2Y0=DY1-DY0:D2Y1=DY2-DY1:D2Y2=DY3-DY2
120  D3Y0=D2Y1-D2Y0:D3Y1=D2Y2-D2Y1
130  D4Y0=D3Y1-D3Y0
140  X0=0 : H=4.6
150  FOR X=0 TO 4.5 STEP .1
160    U=(X-X0)/H
170    FX#=Y#(0)+U*DY0+U*(U-1)*D2Y0/2+U*(U-1)*(U-2)*D3Y0/6
180    PRINT X,FX#
190    PSET(70+XP,200-FX#/100),2
200    XP=XP+.1
210  NEXT X
220  FOR K=1 TO 4
230    Y#(K-1)=Y#(K)
240  NEXT K
250  READ DC#
260  Y#(4)=32000#-DC#/4.6#
270 NEXT M
280 END

```


2. 6 ラグランジュ法によるドブラ曲線の補間

```

10 '*****
20 '***** LAGRANGE *****
30 OPEN "2:NS1-1.N88" FOR OUTPUT AS #1
40 DIM X(30),BU(30),FX1(30),BS(30)
50 SCREEN 3,0
60 X(0)=0!
70 FOR K=1 TO 24
80   X(K)=X(0)+4.6*K
90 NEXT K
100 X(25)=117.5 : X(26)=122.3
110 FOR K=0 TO 10
120   BU(K)=1
130   FOR L=0 TO 10
140     IF K=L THEN 160
150     BU(K)=BU(K)*(X(K)-X(L))
160   NEXT L
170 NEXT K
180 FOR K=0 TO 10
190   READ DC#
200   FDC#=32000#-DC#/4.6#
210   FX1(K)=FDC#/BU(K)
220 NEXT K
230 FOR XT=0! TO 46! STEP .1
240   FX#=0
250   FOR K=0 TO 10
260     BS(K)=1
270     FOR L=0 TO 10
280       IF K=L THEN 300
290       BS(K)=BS(K)*(XT-X(L))
300     NEXT L
310     FX#=FX#+BS(K)*FX1(K)
320   NEXT K
330   WRITE #1,FX#
340   PRINT 2.3+XT;FX#
350   PSET(70+XT,200-FX#/100),6
360 NEXT XT
370 END

```

2. 7 最接近時刻を求める計算

```

10 '*****
20 '***** TIME OF CLOSEST APPROACH *****
30 SCREEN 3,0
40 DIM RS(50),B2(50),A(25),B(25),SD(25),SDR(25)
50 INPUT "FILE NAME OF DATA ";FAMS
60 INPUT "HOW MANY NUMBERS IS A START DATA ";SN
70 INPUT "NUMBER OF DATA ";N
80 OPEN "2:"+FAMS FOR INPUT AS #1 : '//////////
90 FOR K=1 TO SN-2
100   INPUT #1,RSS#,FD#,B1#,B2#
110 NEXT K
120 FOR K=0 TO N
130   INPUT #1,RS(K),FD#,B1#,B2(K)
140 NEXT K
150 '***** REGRESSION LINE *****
160 '***** METHOD OF LEAST SQUARES *****
170 FOR KK=0 TO 7 : '//////////
180   SX#=0 : SSX#=0 : SY#=0 : SSY#=0 : SXY#=0
190   NN=0
200   FOR K=1+KK TO N-KK
210     RX#=RS(K)-RS(1)
220     SX#=-SX#+RX#
230     SSX#=-SSX#+RX#*RX#
240     SY#=-SY#+B2(K)
250     SSY#=-SSY#+B2(K)*B2(K)
260     SXY#=-SXY#+RX#*B2(K)
270     PSET(70+RX#,200-B2(K)*100),4
280     NN=NN+1
290   NEXT K
300   AX#=-SX#/NN
310   AY#=-SY#/NN
320   A(KK)=(SXY#-NN*AX#*AY#)/(SSX#-NN*AX#*AX#)
330   B(KK)=AY#-A(KK)*AX#
340   S1#=-SSX#/NN-AX#*AX#
350   S2#=-SSY#/NN-AY#*AY#
360   S3#=-SXY#/NN-AX#*AY#
370   R#=-S3#/SQR(S1#*S2#)
380   FOR TIS=0 TO RS(N-1-KK)-RS(KK)
390     PSET(70+RS(KK)-RS(0)+TIS,200-(A(KK)*(RS(KK)-RS(0)+TIS)
       +B(KK))*100),2
400   NEXT TIS
410   SD2#=0 : SDR2#=0 : SDR1#=0
420   FOR K=1 TO N-KK
430     SP2#=(B2(K)-(A(KK)*(RS(K)-RS(1))+B(KK)))
440     SPR2#=(RS(K)-RS(1)-(B2(K)-B(KK))/A(KK))
450     SD2#=-SD2#+(B2(K)-(A(KK)*(RS(K)-RS(1))+B(KK)))^2#
460     SDR1#=-SDR1#+(RS(K)-RS(1)-(B2(K)-B(KK))/A(KK))
470     SDR2#=-SDR2#+(RS(K)-RS(1)-(B2(K)-B(KK))/A(KK))^2#
480   NEXT K
490   SD(KK)=SQR(SD2#/NN)
500   HSDR#=-SDR1#/NN
510   SDR(KK)=SQR(SDR2#/NN)
520   SDDR#=-SQR(SDR2#/NN-HSDR#*HSDR#)
530 NEXT KK

```



```

540 ***** MINIMUM SD *****
550 MSD#=100
560 FOR KK=0 TO 7 : '//////////
570 IF SD#(KK) < MSD# THEN MSD#=SD#(KK) : MK=KK
580 NEXT KK
590 ***** T.C.A. *****
600 XO#=-B#(MK)/A#(MK)+RS#(0)
610 PRINT "***** T.C.A.*****"
620 PRINT "NUMBERS " ;:PRINT USING "###";MK+SN
630 PRINT "NUMBER OF DATA " ;:PRINT USING "####";N-2*MK
640 PRINT "INTERVAL TIME OF DATA " ;:PRINT USING "####.###";
      RS#(N)-RS#(1)
650 PRINT "A= " ;:PRINT USING "####.####";A#(MK)
660 PRINT "B= " ;:PRINT USING "####.####";B#(MK)
670 PRINT "S.D. " ;:PRINT USING "####.####";SD#(MK),SDR#(MK),
      R#,HSDR#,SSDR#
680 PRINT "TCA " ;
690 PRINT USING "####.###";XO#
700 END

```

2. 8 最接近時刻法による測位計算

```

10 *****
20 ***** POSITION FIX OF T.C.A. *****
30 DIM ST#(10)
40 DIM DA#(10),DE#(10),ET#(10)
50 SCREEN 3,0
60 ***** DATA *****
70 READ TP#,N#,WO#,WD#,EP#,AO#,OO#,OD#,CO#,AG#,SI#
80 READ TO#,LA#,LO#,H#
90 FOR K=0 TO 7
100 READ DE#(K)
110 NEXT K
120 FOR K=0 TO 7
130 READ DA#(K)
140 NEXT K
150 FOR K=0 TO 7
160 READ ET#(K)
170 NEXT K
180 *****
190 RAD#=3.141592653#/180#
200 L=0
210 WE#=.25068448#
220 RO#=6378.135#
230 F#=1#/298.26#
240 DTP#=-TO#-TP#
250 IF DTP# <= -480# THEN DTP#=DTP#+1440# : GOTO 300
260 T#=360#/N#
270 TR#=1440#-T#
280 IF DTP# > -480 AND DTP# < TR# THEN DTP#=DTP# : GOTO 300
290 IF DTP# >= TR# THEN DTP#=DTP#-1440# : GOTO 300
300 *****
310 INPUT "M.C.TIME(UNIT 0.1 SEC)";KKT1
320 INPUT "K TIME (0,1,2,3,4)";KTI
330 INPUT "DIFFERENCE fT-fR ";DDF#
340 KKT=KKT1
350 MIDC#=1D+34
360 K=KTI : KKK=KKT-1200*K
370 DT#=DTP#+ KKT/600#
380 GOSUB *SATE
390 GOSUB *SATPOS
400 PRINT "SATELITE POSITION (LAT) ";SLAT#
410 PRINT " (LONG)";SLON#
420 ***** POSITION LINE *****
430 INPUT "DIST. DIRECT LONG.(km)";DISTA#
440 PRINT "N-E:90+KAKU--1 ; N-W:90-KAKU--2"
450 PRINT "S-E:90-KAKU--3 ; S-W:90+KAKU--4";
460 INPUT BAN
470 INPUT "KAKU ";KA1#
480 DISTA#=DISTA#-.1
490 DT#=DTP#+ KKT/600#
500 GOSUB *POSITLINE

```



```

510 *****
520 GOSUB *SATE
530 GOSUB *RPOS
540 SST=SQR(XDT#^2+YDT#^2+ZDT#^2)
550 RN=SQR(XN#^2+YN#^2+ZN#^2)
560 ELE#=(XDT#*XN#+YDT#*YN#+ZDT#*ZN#)/(SST#*RN#)
570 ELEC#=(1#-ELE#^2)
580 EL#=ATN(ELE#/ELEC#)/RAD#
590 PRINT EL#;DISTA#
600 IF EL# < 82.3# THEN 480 : '//////////
610 IF EL# > 83.9# THEN 880 : '//////////
620 *****
630 SDC#=0 : RESTORE 1580
640 SDC1#=0 : SDC2#=0
650 FOR K=3 TO 3
660 FOR KK=0 TO 24
670 KKK=KK*10*(28080#/6103#)
680 DT#=DTP#+2#*K+28080#/6103#*KK/60#
690 GOSUB *SATE
700 GOSUB *RPOS
710 ST#(1)=SQR(XDT#^2+YDT#^2+ZDT#^2)
720 IF KK=0 THEN 730 ELSE DCT#=ST#(1)-ST#(0)
730 ST#(0)=ST#(1)
740 IF KK=0 THEN 820 ELSE 750
750 DCO#=(DCT#+28080#/6103#*.00074948125#*DDF#)/.00074948125#
760 READ ODC#
770 SSDC#=ODC#-DCO#
780 IF KK < 5 THEN SDC1#=SDC1#+SSDC#
790 IF KK > 20.5 THEN SDC2#=SDC2#+SSDC#
800 PSET(-50+(120*K+4.601*KK)/1,200-(DDF#-ODC#/4.6)/10 ),4
810 PSET(-50+(120*K+4.601*KK)/1,200-(DDF#-DCO#/4.6)/10 ),2
820 NEXT KK
830 NEXT K
840 SDC#=ABS(SDC1#-SDC2#)
850 PRINT USING "#####.###";KKT,SDC#,LA#,LO#,SLAT#,SLON#,EL#
860 IF MIDC# > SDC# THEN MIDC#=SDC# : MITIM#=KKT : MILAT#=LA# :
      MILON#=LO# : MAEL#=EL# : MSLON#
870 GOTO 480
880 PRINT USING "#####.###";MITIM#,MILAT#,MILON#,MAEL#,MSLAT#,
      MSLON#,MDF#,MIDC#
890 END
900 *****
910 *SATE
920 M#=N#*DT#
930 E#=M#*RAD#+EP#*SIN(M#*RAD#)+(DE#(K)+KKK*(DE#(K+1)-DE#(K))
      /1200#)*RAD#
940 A#=A0#+(DA#(K)+KKK*(DA#(K+1)-DA#(K))/1200#)
950 U#=A#*(COS(E#)-EP#)
960 V#=A#*SIN(E#)
970 O#=O0#+OD#*DT#
980 W#=(W0#-ABS(WD#)*DT#)*RAD#
990 B#=(O#-AG#-WE#*DT#)*RAD#
1000 X#=U#*COS(W#)-V#*SIN(W#)
1010 Y#=U#*SIN(W#)+V#*COS(W#)
1020 Z#=ET#(K)+KKK*(ET#(K+1)-ET#(K))/1200#
1030 XST#=X#*COS(B#)-Y#*CO#*SIN(B#)+Z#*SI#*SIN(B#)
1040 YST#=X#*SIN(B#)+Y#*CO#*COS(B#)-Z#*SI#*COS(B#)
1050 ZST#=Y#*SI#+Z#*CO#
1060 RETURN

```

```

1070 *****
1080 *SATPOS
1090 AR#=A#*(1-EP#*COS(E#))
1100 RS#=R0#*(1-F#)^2/SQR(COS(34.252*RAD#)^2+((1#-F#)^2)
      *(SIN(34.252*RAD#)^2))
1110 LAS#=ZST#/(AR#-(R0#-RS#))
1120 LAS#=ZST#/(AR#-(R0#-6371.479586#))
1130 LAC#=ATN(ZST#/SQR(XST#^2+YST#^2))
1140 ZC#=6371.479586#*SIN(LAC#)
1150 LAS#=ZC#/(RS#+.06)
1160 LASP#=SQR(1#-LAS#^2)
1170 SLAT#=ATN(LAS#/LASP#)/RAD#
1180 SLON#=180+ATN(YST#/XST#)/RAD#
1190 RETURN
1200 *****
1210 *RPOS
1220 D#=SQR(COS(LA#*RAD#)^2+(1#-F#)^2*SIN(LA#*RAD#)^2)
1230 XN#=(R0#/D#+H#)*COS(LA#*RAD#)*COS(LO#*RAD#)
1240 YN#=(R0#/D#+H#)*COS(LA#*RAD#)*SIN(LO#*RAD#)
1250 ZN#=(R0#*(1-F#)^2/D#+H#)*SIN(LA#*RAD#)
1260 XDT#=XST#-XN#
1270 YDT#=YST#-YN#
1280 ZDT#=ZST#-ZN#
1290 RETURN
1300 *****
1310 *POSITLINE
1320 IF BAN = 1 OR BAN = 4 THEN KA#=90#+KA1# ELSE KA#=90-KA1#
1330 CC#=(90#-SLAT#)*RAD#
1340 BB#=DISTA#/COS(34.252#*RAD#)/1.852/60#*RAD#
1350 BCP#=ABS(BB#*COS(34.252#*RAD#)+CC#)/2#
1360 BCM#=ABS(BB#*COS(34.252#*RAD#)-CC#)/2#
1370 BCKP#=ATN(COS(BCM#)/(COS(BCP#)*TAN(KA#/2#*RAD#)))
1380 BCKM#=ATN(SIN(BCM#)/(SIN(BCP#)*TAN(KA#/2#*RAD#)))
1390 KB#=(BCKP#+BCKM#)/RAD#
1400 KC#=(BCKP#-BCKM#)/RAD#
1410 COA#=COS(BCP#)*SIN(KA#/2#*RAD#)/COS(BCKP#)
1420 SIA#=SQR(1#-COA#^2)
1430 A2#=ATN(SIA#/COA#)/RAD#
1440 AA#=A2#*2#
1450 LAP#=90#-AA#
1460 IF (KB#-KC#) > 0 THEN HK#=KC# ELSE HK#=KB#
1470 BH#=BB#*COS(KA1#*RAD#)/RAD#
1480 IF BAN = 1 OR BAN = 3 THEN LOP#=SLON#-HK#
      ELSE LOP#=SLON#+HK#
1490 LA#=LAP#
1500 LO#=LOP#
1510 RETURN

```


2. 9 N N S S のアルゴリズムによる測位計算

```

10 *****
20 ***** NNSS POSITON FIX *****
30 DIM DC=(200),ODC=(200),S=(200),DE=(8),DA=(8),ET=(8)
40 DIM AC=(8,4),SC=(200,4),DSA=(200),DSO=(200)
50 ***** DATA *****
60 INPUT "DL,DLL ";DL,DLL
70 READ TP#,N#,WO#,WD#,EP#,AO#,OO#,OD#,CO#,AG#,SI#
80 READ TO#,LAO#,LOO#,H#
90 FOR K=0 TO 7
100 READ DE=(K)
110 NEXT K
120 FOR K=0 TO 7
130 READ DA=(K)
140 NEXT K
150 FOR K=0 TO 7
160 READ ET=(K)
170 NEXT K
180 *****
190 RAD#=3.141592653#/180#
200 DF#=32000#
210 WE#=.25068448#
220 RO#=6378.135#
230 F#=1#/298.26#
240 *****
250 DTP#=TO#-TP#
260 IF DTP# <= -480# THEN DTP#=DTP#+1440# : GOTO 310
270 T#=360#/N#
280 TR#=1440#-T#
290 IF DTP# > -480 AND DTP# < TR# THEN DTP#=DTP# : GOTO 310
300 IF DTP# >= TR# THEN DTP#=DTP#-1440#
310 LL=0 : RESTORE 1330 : MAEL#=0
320 FOR K=DL TO DLL
330 FOR L=0 TO 25
340 JIK#=(2#*(K-DL)+468#*L/6103#)/2#
350 LA#=LAO#+JIK#*1#*COS(0#*RAD#)/1800#
360 LO#=LOO#+JIK#*1#*(SIN(0#*RAD#)/COS(LAO#*RAD#))/1800#
370 DT#=DTP#+2#*K+468#*L/6103#
380 M#=N#*DT#
390 E#=M#*RAD#+EP#*SIN(M#*RAD#)+(DE#(K)+(DE#(K+1)-DE#(K))
    *L*234#/6103#)*RAD#
400 A#=AO#+DA#(K)+(DA#(K+1)-DA#(K))*L*234#/6103#
410 U#=A#*(COS(E#)-EP#)
420 V#=A#*SIN(E#)
430 O#=OO#+OD#*DT#
440 W#=(WO#-ABS(WD#)*DT#)*RAD#
450 B#=(O#-AG#-WE#*DT#)*RAD#
460 X#=U#*COS(W#)-V#*SIN(W#)
470 Y#=U#*SIN(W#)+V#*COS(W#)
480 ET1#=ET#(K)+(ET#(K+1)-ET#(K))*L*234#/6103#
490 XS#=X#*COS(B#)-Y#*CO#*SIN(B#)+ET1#*SI#*SIN(B#)
500 YS#=X#*SIN(B#)+Y#*CO#*COS(B#)-ET1#*SI#*COS(B#)
510 ZS#=Y#*SI#+ET1#*CO#

```

```

520 *****
530 D#=SQR(COS(LA#*RAD#)^2+((1#-F#)^2)*(SIN(LA#*RAD#)^2))
540 XN#=(RO#/D#+H#)*COS(LA#*RAD#)*COS(LO#*RAD#)
550 YN#=(RO#/D#+H#)*COS(LA#*RAD#)*SIN(LO#*RAD#)
560 ZN#=(RO#*(1#-F#)^2/D#+H#)*SIN(LA#*RAD#)
570 XD#=XS#-XN#
580 YD#=YS#-YN#
590 ZD#=ZS#-ZN#
600 S#(LL)=SQR(XD#^2+YD#^2+ZD#^2)
610 IF K=DL AND L=0 THEN 620 ELSE DC#(LL)=S#(LL)-S#(LL-1)
620 DXN#=-((RO#*(1#-F#)^2/D#+H#)*SIN(LA#*RAD#)*COS(LO#*RAD#)
630 DYN#=-((RO#*(1#-F#)^2/D#+H#)*SIN(LA#*RAD#)*SIN(LO#*RAD#)
640 DZN#=((RO#*(1#-F#)^2/D#+H#)*COS(LA#*RAD#)
650 DSA#(LL)=-((XD#*DXN#+YD#*DYN#+ZD#*DZN#)/S#(LL)
660 DSO#(LL)=(XD#*YN#-YD#*XN#)/S#(LL)
670 IF K=DL AND L=0 THEN 710 ELSE 680
680 READ DCO#
690 ODC#(LL)=.00074948125#*(DCO#-DF#*28080#/6103#)
700 IF LL MOD 26 = 0 THEN ODC#(LL)=.00074948125#*(DCO#-DF#
    *30360#/6103#)
710 RN#=SQR(XN#^2+YN#^2+ZN#^2)
720 ELE#=(XD#*XN#+YD#*YN#+ZD#*ZN#)/(S#(LL)*RN#)
730 ELEC#=SQR(1#-ELE#^2)
740 EL#=ATN(ELE#/ELEC#)/RAD#
750 IF MAEL#<EL# THEN MAEL#=EL# : MAL=LL
760 IF K=DL AND L=0 THEN 820 ELSE 770
770 SC#(LL,1)=DSA#(LL-1)-DSA#(LL)
780 SC#(LL,2)=DSO#(LL-1)-DSO#(LL)
790 SC#(LL,3)=-.00074948125#*28080#/6103#
800 IF LL MOD 26 = 0 THEN SC#(LL,3)=-.00074948125#*30360#/6103#
810 SC#(LL,4)=DC#(LL)-ODC#(LL)
820 IF K=DLL AND L=0 THEN 870
830 LL=LL+1
840 NEXT L
850 NEXT K
860 ***** SEIKI HOUTEISHIKI *****
870 EPS#=1D-38
880 FOR J=1 TO 4
890 FOR I=1 TO 3
900 AC#(I,J)=0#
910 NEXT I,J
920 FOR J=1 TO 4
930 FOR I=1 TO 3
940 FOR K=1 TO LL
950 AC#(I,J)=AC#(I,J)+SC#(K,J)*SC#(K,I)
960 NEXT K
970 NEXT I
980 NEXT J

```



```

990 ***** SAISHOU JIJYOUHOU *****
1000 FOR K=1 TO 3
1010   WC#=AC#(K,K)
1020   AWC#=ABS(WC#)
1030   IF AWC# < EPS# THEN PRINT K;" ILL CONDITION" : END
1040   FOR J=K TO 4
1050     AC#(K,J)=AC#(K,J)/WC#
1060   NEXT J
1070   FOR I=1 TO 3
1080     IF I = K THEN 1130
1090     WC#=AC#(I,K)
1100     FOR J=K TO 4
1110       AC#(I,J)=AC#(I,J)-WC#*AC#(K,J)
1120     NEXT J
1130   NEXT I
1140 NEXT K
1150 LA0#=LA0#+AC#(1,4)/RAD#
1160 LO0#=LO0#+AC#(2,4)/RAD#
1170 DF#=DF#+AC#(3,4)
1180 PRINT USING "#####.#####";LA0#;LO0#;
1190 PRINT USING "#####.#####";DF#;
1200 PRINT USING "#####.#####";AC#(1,4);AC#(2,4);AC#(3,4);MAEL#
1210 IF ABS(AC#(1,4)) >= .00000001# THEN 310
1220 IF ABS(AC#(2,4)) >= .00000001# THEN 310
1230 IF ABS(AC#(3,4)) >= .017# THEN 310
1240 PRINT USING "#####.#####";LA0#;LO0#;DF#;MAEL#;
1250 PRINT USING "#####";MAL
1260 END

```

2. 10 ドブラ周波数の誤差

```

10 *****
20 ***** NNSS DOPPLER ERROR *****
30 DIM DC#(200),ODC#(200),S#(200),DE#(8),DA#(8),ET#(8)
40 DIM AC#(8,4),SC#(200,4),DSA#(200),DSO#(200)
50 SCREEN 3,0
60 ***** DATA *****
70 READ TP#,N#,W0#,WD#,EP#,AO#,OO#,OD#,CO#,AG#,SI#
80 READ T0#,LA#,LO#,H#
90 FOR K=0 TO 7
100   READ DE#(K)
110   NEXT K
120   FOR K=0 TO 7
130     READ DA#(K)
140     NEXT K
150     FOR K=0 TO 7
160       READ ET#(K)
170       NEXT K
180 *****
190 RAD#=3.141592653#/180#
200 DF#=33792#
210 WE#=.25068448#
220 RO#=6378.135#
230 F#=1#/298.26#
240 *****
250 DTP#=T0#-TP#
260 IF DTP# <= -480# THEN DTP#=DTP#+1440# : GOTO 310
270 T#=360#/N#
280 TR#=1440#-T#
290 IF DTP# > -480 AND DTP# < TR# THEN DTP#=DTP# : GOTO 310
300 IF DTP# >= TR# THEN DTP#=DTP#-1440#
310 LL=0 : RESTORE 1030 : MAEL#=0
320 FOR K=0 TO 6
330   FOR L=0 TO 25
340     DT#=DTP#+2#*K+468#*L/6103#
350     M#=N#*DT#
360     E#=M#*RAD#+EP#*SIN(M#*RAD#)+(DE#(K)+(DE#(K+1)-DE#(K))
          *L*234#/6103#)*RAD#
370     A#=AO#+DA#(K)+(DA#(K+1)-DA#(K))*L*234#/6103#
380     U#=A#*(COS(E#)-EP#)
390     V#=A#*SIN(E#)
400     O#=OO#+OD#*DT#
410     W#=(W0#-ABS(WD#)*DT#)*RAD#
420     B#=(O#-AG#-WE#*DT#)*RAD#
430     X#=U#*COS(W#)-V#*SIN(W#)
440     Y#=U#*SIN(W#)+V#*COS(W#)
450     ET1#=ET#(K)+(ET#(K+1)-ET#(K))*L*234#/6103#
460     XS#=X#*COS(B#)-Y#*CO#*SIN(B#)+ET1#*SI#*SIN(B#)
470     YS#=X#*SIN(B#)+Y#*CO#*COS(B#)-ET1#*SI#*COS(B#)
480     ZS#=Y#*SI#+ET1#*CO#

```



```

490 *****
500 D#=SQR(COS(LA#*RAD#)^2+((1#-F#)^2)*(SIN(LA#*RAD#)^2))
510 XN#=(R0#/D#+H#)*COS(LA#*RAD#)*COS(LO#*RAD#)
520 YN#=(R0#/D#+H#)*COS(LA#*RAD#)*SIN(LO#*RAD#)
530 ZN#=(R0#*(1-F#)^2/D#+H#)*SIN(LA#*RAD#)
540 XD#=XS#-XN#
550 YD#=YS#-YN#
560 ZD#=ZS#-ZN#
570 S#(LL)=SQR(XD#^2+YD#^2+ZD#^2)
580 IF K = 0 AND L=0 THEN 590 ELSE DC#(LL)=S#(LL)-S#(LL-1)
590 DXN#=-((R0#*(1-F#)^2/D#^3+H#)*SIN(LA#*RAD#)*COS(LO#*RAD#)
600 DYN#=-((R0#*(1-F#)^2/D#^3+H#)*SIN(LA#*RAD#)*SIN(LO#*RAD#)
610 DZN#=((R0#*(1-F#)^2/D#^3+H#)*COS(LA#*RAD#)
620 DSA#(LL)=-((XD#*DXN#+YD#*DYN#+ZD#*DZN#)/S#(LL)
630 DSO#(LL)=(XD#*YN#-YD#*XN#)/S#(LL)
640 IF K=0 AND L=0 THEN 710 ELSE 650
650 READ DCO#
660 ODC#(LL)=.00074948125#*(DCO#-DF#*28080#/6103#)
670 IF LL MOD 26 = 0 THEN ODC#(LL)=.00074948125#*(DCO#-DF#
        *30360#/6103#)
680 DCC#=(DC#(LL)+DF#*.00074948125#*28080#/6103#)/.00074948125#
690 IF LL MOD 26 = 0 THEN DCC#=(DC#(LL)+DF#*.00074948125#*30360#
        /6103#)/.00074948125#
700 SSDC#=DCO#-DCC#
710 RN#=SQR(XN#^2+YN#^2+ZN#^2)
720 ELE#=(XD#*XN#+YD#*YN#+ZD#*ZN#)/(S#(LL)*RN#)
730 ELEC#=SQR(1#-ELE#^2)
740 EL#=ATN(ELE#/ELEC#)/RAD#
750 IF MAEL#<EL# THEN MAEL#=EL# : MAL=LL
760 IF K=6 AND L=23 THEN 860
770 SSDCC#=SSDC#/(28080#/6103#)
780 IF LL MOD 26 = 0 THEN SSDCC#=SSDC#/(30360#/6103#): GOTO 820
790 IF LL > 156 THEN 820
800 IF LL=1 THEN PSET ( 82+LL*2,200-(SSDCC#-.237732248#)*30),7
810 LINE -( 82+LL*2,200-(SSDCC#-.237732248#)*30),7
820 PRINT LL;DCO#;DCC#;SSDCC#-0#;EL#
830 LL=LL+1
840 NEXT L
850 NEXT K
860 ***** AXIS *****
870 LINE( 82,200)-(498,200)
880 LINE( 82, 80)-( 82,320)
890 FOR K=0 TO 8
900 LINE(82+K*52,198)-(82+K*52,202)
910 NEXT K
920 FOR K=0 TO 8
930 LINE( 80,80+K*30)-( 84,80+K*30)
940 NEXT K
950 LINE(82+90*2,200)-(82+90*2,230)
960 END

```

2. 1 1 送信周波数が変化したときのドプラカウントデータの作成

```

10 *****
20 ***** DOPPLER ERROR (TRANSMISSION FREQUENCY VARY) *****
30 DIM DC#(481),S#(481)
40 DIM DSA#(481),DSO#(481)
50 OPEN "3:NSSW10.DA2" FOR OUTPUT AS #1 : '//////////
60 ***** DATA *****
70 READ TP#,N#,WO#,WD#,EP#,AO#,OO#,OD#,CO#,AG#,SI#
80 READ TO#,LA#,LO#,H#
90 KL=1 :KLL=5
100 *****
110 RAD#=3.141592653#/180#
120 DF#=32000#
130 WE#=.25068448#
140 RO#=6378.135#
150 F#=1#/298.26#
160 *****
170 DTP#=TO#-TP#
180 IF DTP# <= -480# THEN DTP#=DTP#+1440# : GOTO 230
190 T#=360#/N#
200 TR#=1440#-T#
210 IF DTP# > -480 AND DTP# < TR# THEN DTP#=DTP# : GOTO 230
220 IF DTP# >= TR# THEN DTP#=DTP#-1440#
230 LL=0 : MAEL#=0
240 FOR K=KL TO KLL
250 FOR L=0 TO 59
260 DT#=DTP#+2#*K+ 2#*L/60#
270 M#=N#*DT#
280 E#=M#*RAD#+EP#*SIN(M#*RAD#)
290 A#=AO#
300 U#=A#*(COS(E#)-EP#)
310 V#=A#*SIN(E#)
320 O#=OO#+OD#*DT#
330 W#=(WO#-ABS(WD#)*DT#)*RAD#
340 B#=(O#-AG#-WE#*DT#)*RAD#
350 X#=U#*COS(W#)-V#*SIN(W#)
360 Y#=U#*SIN(W#)+V#*COS(W#)
370 XS#=X#*COS(B#)-Y#*CO#*SIN(B#)
380 YS#=X#*SIN(B#)+Y#*CO#*COS(B#)
390 ZS#=Y#*SI#

```



```

400 *****
410 D=SQR(COS(LA#*RAD#)^2+((1#-F#)^2)*(SIN(LA#*RAD#)^2))
420 XN#=(R0#/D#+H#)*COS(LA#*RAD#)*COS(LO#*RAD#)
430 YN#=(R0#/D#+H#)*COS(LA#*RAD#)*SIN(LO#*RAD#)
440 ZN#=(R0#*(1-F#)^2/D#+H#)*SIN(LA#*RAD#)
450 XD#=XS#-XN#
460 YD#=YS#-YN#
470 ZD#=ZS#-ZN#
480 S#(LL)=SQR(XD#^2+YD#^2+ZD#^2)
490 IF K =KL AND L=0 THEN 500 ELSE DC#(LL)=S#(LL)-S#(LL-1)
500 DXN#=-((R0#*(1-F#)^2/D#^3+H#)*SIN(LA#*RAD#)*COS(LO#*RAD#)
510 DYN#=-((R0#*(1-F#)^2/D#^3+H#)*SIN(LA#*RAD#)*SIN(LO#*RAD#)
520 DZN#=((R0#*(1-F#)^2/D#^3+H#)*COS(LA#*RAD#)
530 DSA#(LL)=-(XD#*DXN#+YD#*DYN#+ZD#*DZN#)/S#(LL)
540 DSO#(LL)=(XD#*YN#-YD#*XN#)/S#(LL)
550 IF K=KL AND L=0 THEN 580 ELSE 560
560 DCC#=(DC#(LL)+DF#*.00074948125#*2#)/.00074948125#
570 DCCE#=(DC#(LL)+(DF#-(LL-1)*.4/60#*2#)*.00074948125#*2#)
    /.00074948125#
580 RN#=SQR(XN#^2+YN#^2+ZN#^2)
590 ELE#=(XD#*XN#+YD#*YN#+ZD#*ZN#)/(S#(LL)*RN#)
600 ELEC#=SQR(1#-ELE#^2)
610 EL#=ATN(ELE#/ELEC#)/RAD#
620 IF MAEL#<EL# THEN MAEL#=EL# : MAL=LL
630 IF LL=0 THEN 670
640 PRINT LL;:PRINT USING "#####.#####";DCC#;DCCE#;
    DCC#-DCCE#;EL#
650 WRITE #1,DCC#,DCCE#
660 IF K=KLL AND L=0 THEN 700
670 LL=LL+1
680 NEXT L
690 NEXT K
700 END

```